

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και
Φυσικών Επιστημών

Τομέας Φυσικής



*ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΓΪΔΕΥΣΗΣ ΝΑΝΟΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΔΟΜΩΝ ΜΕ ΧΡΪΣΗ
ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ COMSOL MULTIPHYSICS*

ΕΙΡΗΝΗ ΚΥΡΪΑΚΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΤΣΙΓΑΡΪΔΑΣ

ΑΘΪΝΑ 2021

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

*ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΓΪΔΕΥΣΗΣ ΝΑΝΟΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΔΟΜΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ COMSOL MULTIPHYSICS*

ΕΙΡΗΝΗ ΚΥΡΙΑΚΟΥ
Email: eirinikyriakou10@gmail.com

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΤΣΙΓΑΡΙΔΑΣ(Επιβλέπων)
ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΓΕΩΡΓΑΚΪΛΑΣ
ΒΑΣΪΛΗΣ ΓΙΑΝΝΟΠΑΠΑΣ

ΑΘΗΝΑ 2021

Ευχαριστίες

Με την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους στάθηκαν δίπλα μου σε αυτό το ταξίδι.

Πρώτον απ' όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γεώργιο Τσιγαρίδα που ήταν δίπλα μου σε κάθε μου βήμα. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την βοήθεια του σχετικά με το πρόγραμμα Comsol Multiphysics, η καθοδήγηση του ήταν πολύτιμη.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Ελίνα Σπυράτου, η οποία με ανιδιοτέλεια ήταν διαθέσιμη ανα πάσα στιγμή για οποιαδήποτε βοήθεια χρειαστώ. Οι γνώσεις της και οι υποδείξεις της για την οπτική παγίδευση ήταν καθοριστικές για το τελικό αποτέλεσμα.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω και στην κα. Μυρσίνη Μακροπούλου, καθώς χωρίς αυτή δεν θα είχα ακολουθήσει αυτό το ακαδημαϊκό μονοπάτι.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ χρωστάω στην οικογένεια μου και κυρίως στην αδερφή μου Μαργαρίτα. Χωρίς την δική της υποστήριξη, πρακτική και ψυχολογική δεν θα τα είχα καταφέρει.

Περίληψη

Η οπτική παγίδευση αποτελεί μια μη-επεμβατική μέθοδο, η οποία μας επιτρέπει τη παγίδευση και το χειρισμό νανοσωματιδίων με την χρήση μιας ισχυρά εστιασμένης δέσμης λέιζερ.

Στην επιστημονική κοινότητα είναι ευρέως γνωστή με το όνομα οπτική λαβίδα (Optical tweezers) αφού με τον όρο λαβίδα εννοούμε ότι μπορούμε να χειριστούμε κάτι χωρίς όμως να το ακουμπήσουμε. Αυτή η μέθοδος έχει γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια αφού χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία (Μικροηλεκτρονική και Νανοτεχνολογία) αλλά κυρίως σε βιοϊατρικές εφαρμογές.

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας έχω ασχοληθεί με την υπολογιστική προσομοίωση μιας οπτικής παγίδας σε νανοσωματίδια. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβολή της ισχύς της παγίδας, καθώς αλλάζει το σχήμα του νανοσωματιδίου και από δίσκος μετατρέπεται σε ελλειψοειδές. Εκτός από την αλλαγή στο σχήμα του υπο παγίδευση σωματιδίου, μελετήθηκε και η διάμετρος της δέσμης κατά την παγίδευση και πως η αύξηση/ μείωση της θα επηρέαζε την παγίδα.

Έτσι γνωρίζοντας με ποιες τιμές παραμέτρων η ισχύς παγίδευσης είναι μέγιστη, μπορεί να γίνει επιλεκτική παγίδευση συγκεκριμένων σωματιδίων .

Με αυτό το υπόβαθρο, μπορεί να γίνει η προέκταση για οπτική παγίδευση ερυθροκυττάρων. Τα ερυθροκύτταρα έχουν την ιδιότητα να αλλάζουν εύκολα σχήμα για την εύκολη μετακίνηση τους ανάμεσα στα αγγεία. Παρόλα αυτά το σχήμα τους παραμορφώνεται είτε λόγω ασθενειών είτε λόγω του ωσμωτικού περιβάλλοντος που βρίσκονται. Με την οπτική παγίδευση μπορεί να γίνει μελέτη των ιδιοτήτων των ερυθροκυττάρων καθώς και διάγνωση ασθενειών που έχουν προκαλέσει την παραμόρφωση στο σχήμα τους.

Αρχικά στο κεφάλαιο 1 εξηγήθηκαν βασικές αρχές της οπτικής παγίδευσης, καθώς και το πλήθος των εφαρμογών στις οποίες θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αυτή η διάταξη. Στο κεφάλαιο 2 επεξηγήθηκε αναλυτικά η πειραματική διάταξη της οπτικής λαβίδας, καθώς και τα είδη των οπτικών παγίδων που υπάρχουν. Στη συνέχεια στο 3^ο κεφάλαιο περιεγράφηκε η διαδικασία που ακολουθήθηκε στο COMSOL και στη συνέχεια έγινε παρουσίαση των αποτελεσμάτων που εξάχθηκαν. Τέλος στο 4^ο κεφάλαιο έγινε η μετάβαση στα ερυθροκύτταρα και στις ασθένειες που μελετώνται με βάση την οπτική λαβίδα.

Abstract

Optical trapping is a non-invasive method that allows the capture and manipulation of nanoparticles with the use of a highly focused laser beam.

It is widely known with the name 'optical tweezers' because with the term «tweezer» we imply that we can manipulate something without touching it. Optical tweezers have rapidly grown from a novelty to a widely used and indispensable tool in many fields, including nanotechnology, microelectronics and in biomedical applications.

In this dissertation, I got involved with the computational simulation of an optical trap that captures nanoparticles. A very interesting aspect to be studied, it's the change of the trap's strength while the nanoparticle's shape change. Also the width of the laser beam was changing in order to locate the value that the optical strength was maximized.

Based on the above we can extend our research in the study of red blood cells (RBC). Red blood cells have the ability to altered in order to pass through the blood vessels, nevertheless their shape can deform because of some diseases or due to the osmotic environment that they are placed. With the use of optical tweezers we can study the mechanical properties of RBC and the diseases that cause deformation.

Firstly, we started the thesis by explaining the theoretical background and the variety of the applications that optical tweezers can be used. Secondly, we describe the experimental set up of the trap as well as the many different setups of optical traps. Afterwards the procedure of the experiment was explained as well as the results of the simulation. At the end we explained how all the above could be applied in the study of red blood cells.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
Περίληψη	4
Abstract	5
Περιεχόμενα	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- Βασικές αρχές και εφαρμογές της οπτικής παγίδευσης	9
1.1 Εισαγωγή.....	9
1.2 Θεωρητικό υπόβαθρο.....	9
1.2.1 Σκέδαση Mie & Rayleigh.....	13
1.2.2 Υπολογισμός της οπτικής δύναμης μέσω του τανυστή τάσης Maxwell.....	16
1.3 Ιστορική Αναδρομή	19
1.4 Εφαρμογές της οπτικής λαβίδας	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- Πειραματικές Διατάξεις οπτικών παγίδων	26
2.1 Πειραματική διάταξη	26
2.2 Διάφορα είδη οπτικών λαβίδων	30
2.2.1 Συμβατική οπτική λαβίδα	31
2.2.2 Ολογραφική οπτική παγίδα.....	31
2.2.3 Πλασμονική οπτική παγίδα	31
2.2.4 Παγίδα μονής οπτικής ίνας.....	32
2.2.5 Παγίδα διπλής οπτικής ίνας	33
2.2.6 Οπτικές ίνες ολικής εσωτερικής ανάκλασης	34
2.2.7 Οπτική ίνα βαθμιαίου δείκτη διάθλασης.....	35
2.2.8 Subwavelength Optical Fiber For Evanescent Fields-Based Trapping:.....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Μελέτη της οπτικής παγίδας σε σωματίδια	38
3.1 Περιγραφή Comsol	38
3.2 Περιγραφή διαδικασίας.....	42
3.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων / συμπερασμάτων	44
3.3.1 $\lambda=1064$ nm	50
3.3.2 $\lambda=656$ nm	55

3.4 Ακτινική μεταβολή της τοποθέτησης της δέσμης πάνω στο ναοσωματίδιο	60
3.4.1 $\lambda=1064$ nm	60
3.4.2 $\lambda=656$ nm	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4- Μελέτη της οπτικής παγίδευσης ερυθροκυττάρων	70
4.1 Εισαγωγή.....	70
4.2 Μελέτη ασθενειών των ερυθροκυττάρων με την χρήση της οπτικής λαβίδας	70
4.2.1 Διαδικασία ερυθροποίησης	70
4.2.2 Δρεπανοκυτταρική αναιμία.....	71
4.2.3 οξειδωτικό στρες στα ερυθροκύτταρα.....	72
4.2.4 Ωσμωτικό Περιβάλλον του ερυθροκυττάρου	72
4.3 Υπολογιστική προσομοίωση ενός ερυθροκυττάρου.....	73
Δυνατότητες για μελλοντική επέκταση	75
Βιβλιογραφία	76
Παράρτημα Α για $\lambda=1064$nm	81
Παράρτημα Β για $\lambda=656$nm	110

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-Βασικές αρχές και εφαρμογές της οπτικής παγίδευσης

1.1 Εισαγωγή

Η οπτική λαβίδα (Optical tweezers) αποτελείται από 1 ή και περισσότερες δέσμες laser οι οποίες είναι ισχυρά εστιασμένες. Η φυσική που κρύβεται πίσω από αυτή την μη-επεμβατική μέθοδο είναι πολύ ενδιαφέρουσα, καθώς είναι πολύ εντυπωσιακό το πως κάτι άυλο όπως το φως να μπορεί να παγιδεύσει την ύλη.

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην πίεση ακτινοβολίας που ασκείται στο σωματίδιο. Το λέιζερ (laser) είναι μια πηγή που εκπέμπει φως το οποίο όπως γνωρίζουμε έχει κυματοσωματιδιακό χαρακτήρα. Εκτός από ηλεκτρομαγνητικό κύμα που θεωρείται στην κλασική φυσική έχει και σωματιδιακό χαρακτήρα όπου φορέας του είναι το γνωστό σε όλους φωτόνιο. Το φως ως γνωστών μεταφέρει ορμή, και έτσι οποιαδήποτε αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη που προκαλεί την μεταβολή της ορμής του, θα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας δύναμης. Τέτοιου είδους αλληλεπιδράσεις τις συναντάμε παντού, μέσω της διάθλασης, ανάκλασης, απορρόφησης και της σκέδασης του φωτός. Ακόμη και το φως του ήλιου μας “σπρώχνει” με πολύ μικρές δυνάμεις, που προφανώς είναι αδύνατο να νιώσουμε.[1]

Έτσι το φωτόνιο όταν εκπέμπεται από την πηγή laser και προσπίπτει στο σωματίδιο, μεταβάλλεται η ορμή του με αποτέλεσμα να δημιουργούνται δυνάμεις της τάξης του picoNewton.

1.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω το φως έχει ένα δυικό χαρακτήρα, δηλαδή μπορεί να θεωρηθεί και σαν κύμα αλλά και σαν σωματίδιο. Για την αναλυτική επεξήγηση του φαινομένου της οπτικής παγίδευσης θα χρησιμοποιούνται στοιχεία και από την κλασική φυσική αλλά και από την κβαντομηχανική. Δηλαδή εφαρμόζεται μια ημικλασική προσέγγιση.

Γνωρίζουμε αρχικά ότι η ενέργεια ενός φωτονίου είναι

$$E = h \cdot \nu = \hbar \cdot \omega \quad (1.1)$$

όπου h είναι η σταθερά του Planck ενώ ν είναι η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (οι δυο εκφράσεις είναι ισοδύναμες απλά στην δεύτερη έχει προστεθεί ο όρος 2π που υποδηλώνει την κυκλική συχνότητα).

Ακόμα μια εξίσωση της ενέργειας φωτονίου που γνωρίζουμε ισοδύναμη με την πιο πάνω είναι η

$$E = p \cdot c \quad (1.2)$$

όπου p = ορμή του φωτονίου και

c = ταχύτητα του φωτός.

$$\text{Λύνοντας ως προς την ορμή του φωτονίου έχουμε } p = E/c \quad (1.3)$$

Η πιο πάνω σχέση ισχύει στην περίπτωση που το φωτόνιο διαδίδεται στο κενό και κινείται με την ταχύτητα του φωτός, κάτι το οποίο δεν ισχύει για το δεδομένη περίπτωση. Έτσι θα πρέπει να εισάγουμε το δείκτη διάθλασης n του υλικού στο οποίο “ταξιδεύει” μέσα το φωτόνιο.

$$\text{Η ταχύτητα του φωτονίου είναι } U = c/n \quad (1.4) \text{ και έτσι η σχέση που προκύπτει είναι}$$

$$p = E \cdot n / c \quad (1.5)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (1.4) και (1.5) προκύπτει η ορμή του φωτονίου ως συνάρτηση της συχνότητας ν .

$$p = h \cdot \nu \cdot n / c \quad (1.6)$$

Όμως επειδή $\nu = \frac{v}{\lambda}$ (1.7) τότε η τελική μορφή της ορμής των φωτονίων είναι

$$p = n \cdot h / \lambda \quad (1.8)$$

n: δείκτης διάθλασης

h: σταθερά του Planck

λ : μήκος κύματος

Καθώς τα φωτόνια διαδίδονται σε ένα μέσο με δείκτη διάθλασης n_1 , όταν προσπέσουν σε ένα μέσο με διαφορετικό δείκτη διάθλασης n_2 (όπου $n_2 > n_1$) είτε θα ανακλαστούν, είτε θα σκεδαστούν, είτε θα διέλθουν μέσα στο μέσο ή ακόμα και συνδυασμός των πιο πάνω περιπτώσεων. Έστω ότι μια δέσμη φωτονίων με ορμή $p_{init} = E \cdot n / v$ (1.9) προσκρούσει σε μια επιφάνεια, τότε ένα μέρος της R θα ανακλαστεί και ένα άλλο T θα διαδοθεί μέσα στην επιφάνεια. Το μέτρο της τελικής ορμής $p_{τελική}$ θα αποτελείται από 2 συνιστώσες. Την συνιστώσα $p_R = R \cdot E \cdot n_1 / c$ (1.10)

που είναι η ορμή της δέσμης φωτονίων που έχει ανακλαστεί, και την $P_T = T \cdot E \cdot n_2 / c$ (1.11) η ορμή των φωτονίων που συνεχίζουν να διαδίδονται στο μέσο με n_2 . Γνωρίζουμε ότι λόγω της αρχής διατήρησης της ενέργειας ισχύει $R+T=1$, συνεπώς έχουμε: $p_T = (1 - R) E n_2 / c$. Η διαφορά της ορμής μεταξύ της προσπίπτουσας δέσμης, της ανακλώμενης και διαδιδόμενης δέσμης, $\Delta p = p_{in} + p_R - p_T$ (1.12), μεταφέρεται στην επιφάνεια, όπου ασκείται μια δύναμη, το μέτρο της οποίας είναι σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Newton, δίνεται από τη σχέση:

Εκτός όμως από διατήρηση της ενέργειας έχουμε και διατήρηση της ορμής πάνω στην διεπιφάνεια ανάμεσα στα 2 μέσα διάδοσης => $P(in)+P(R)=P(T)$ => $P(initial)=P(t)-P(r)$. (1.13)

Η σχέση αυτή δεν είναι η τελική σχέση στην οποία μπορούμε να καταλήξουμε, αφού δεν έχουμε λάβει υπόψιν ακόμα ότι ένα ποσοστό της ενέργειας απορροφάτε από το μέσο στο οποίο διαδίδεται η δέσμη. Έτσι προκύπτει ότι $P(initial)=P(t)-P(r)+\Delta p$ =>

$$\Delta p = P(initial) - P(t) + P(r) \quad (1.14)$$

Από τον 2ο νόμο του Νεύτωνα γνωρίζουμε ότι η μεταβολή ορμής ισούται με μια δύναμη. Έτσι όταν τα φωτόνια προσκρούουν στο σωματίδιο και έχουμε δηλ. μεταβολή της ορμής τους ταυτόχρονα ασκούν στο σωματίδιο μια δύναμη.

$$F = \Delta P / \Delta \tau \Rightarrow F = n \cdot \Delta E / \Delta T \cdot c \quad (P = \Delta E / \Delta t \text{ όπου } P: \text{ισχύς της δέσμης})$$

$$\Rightarrow F = n \cdot Q \cdot P / c \quad (1.15)$$

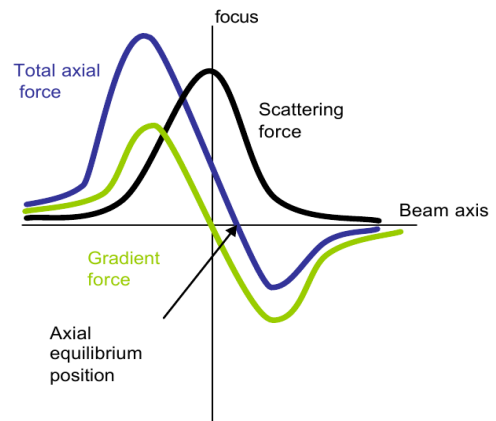
Στην πιο πάνω σχέση της οπτικής δύναμης έχουμε εισάγει ένα παράγοντα Q (Quality factor), ο οποίος είναι πολύ σημαντικός στην ερμηνεία της οπτικής παγίδας. Ο παράγοντας Q μας δείχνει το ποσοστό της ενέργειας της δέσμης που μεταφέρθηκε τελικά από το φωτόνιο στο σωματίδιο-στόχο. Έτσι κατά συνέπεια μας δείχνει την απόδοση της οπτικής παγίδας. Όταν $Q=1$ τότε έχουμε **πλήρη** απορρόφηση, ενώ για $Q=2$ πλήρη ανάκλαση.

Τέλος για την πίεση ακτινοβολίας μπορούμε να διαιρέσουμε και τα 2 μέλη της σχέσης (1.15) με το εμβαδό της επιφάνειας που προσπίπτει η δέσμη. Έτσι η προκύπτει

$$P_{press} = n \cdot I \cdot Q / c \quad (1.16)$$

όπου I είναι η ένταση της δέσμης laser.

Αφού έχουμε αποδεχτεί ότι τα φωτόνια μεταφέρουν ορμή, άρα υπάρχει και η δύναμη πίεσης ακτινοβολίας. Αυτή η δύναμη ουσιαστικά “σπρώχνει” το σωματίδιο στην κατεύθυνση διάδοσης του φωτός λόγω της ανάκλασης ή της απορρόφησης. Η πιο πάνω δύναμη είναι η λεγόμενη οπτική δύναμη και ασκείται από τα φωτόνια στο σωματίδιο. Η οπτική δύναμη αποτελείται από 2 συνιστώσες, την δύναμη βαθμίδας και την δύναμη σκέδασης.



Εικόνα 1: Η πρόσθεση της δύναμης σκέδασης και της δύναμης βαθμίδας δημιουργούν μια θέση ισορροπίας στον άξονα της δέσμης[9]

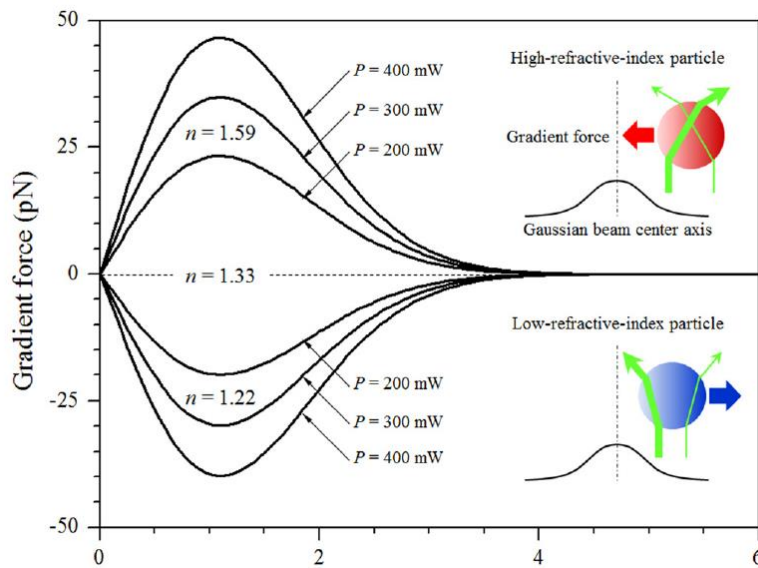
Δύναμη σκέδασης (Scattering Force): Η δύναμη

σκέδασης είναι μια μη-συντηρητική δύναμη, η οποία έχει κατεύθυνση ίδια με αυτή της διάδοσης του φωτός και είναι ανάλογη της έντασης του φωτός.[2] Όταν η δέσμη προσπίπτει στο σωματίδιο ένα μέρος της θα απορροφηθεί ενώ το μεγαλύτερο μέρος της θα σκεδαστεί. Στο εσωτερικό του σωματιδίου η δέσμη υπόκειται σε πολλαπλές σκεδάσεις μέχρι να εξέλθει από την άλλη πλευρά του σωματιδίου. Στην περίπτωση που έχουμε ένα ισοτροπικό σκεδαστή, τότε όλες οι συνιστώσες αλληλοαναιρούνται εκτός από την κύρια συνιστώσα διάδοσης του φωτός. Ουσιαστικά οι 2 σημαντικές σκεδάσεις που συνεισφέρουν στον υπολογισμό της δύναμης σκέδασης, είναι αυτές της εισερχόμενης και εξερχόμενης δέσμης.

Δύναμη βαθμίδας :

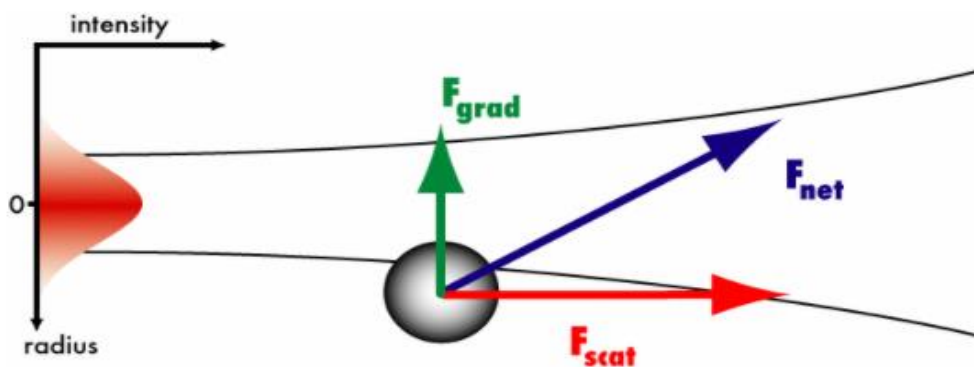
Η δύναμη βαθμίδας είναι η δύναμη που ουσιαστικά κρατάει δέσμιο το σωματίδιο μέσα στην οπτική παγίδα. Είναι μια συντηρητική δύναμη η οποία έχει κατεύθυνση πάντα προς την εστία της δέσμης εκεί δηλ. που η ένταση της δέσμης είναι υψηλότερη. Η ύπαρξη της δύναμης βαθμίδας προκύπτει από τη δυναμική ενέργεια ενός διπόλου μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο. Το φως όντας ηλεκτρομαγνητικό κύμα πολώνει το σωματίδιο, το οποίο συμπεριφέρεται σαν ένα δίπολο. Όταν ένα δίπολο βρίσκεται μέσα σε ένα ανομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο του ασκείται μια δύναμη βαθμίδας, κάτι παρόμοιο με μια μεταλλική σφαίρα που ελκύεται από ένα μαγνήτη.

Η πιο πάνω αναφορά σχετικά με την διεύθυνση της δύναμης βαθμίδας δεν έχει απολύτως σωστή, καθώς δεν ισχύει πάντα ότι κατευθύνεται προς την εστία της δέσμης. Η πιο πάνω περίπτωση ισχύει μόνο όταν το σωματίδιο έχει θετική πολωσιμότητα. Δηλαδή το σωματίδιο έχει δείκτη διάθλασης μεγαλύτερο απ’ ότι το μέσο στο οποίο βρίσκεται. Μόνο σε αυτή την περίπτωση η δύναμη βαθμίδας έχει διεύθυνση προς την εστία της δέσμης. Στην αντίθετη περίπτωση όπου ο δείκτης διάθλασης του σωματιδίου είναι μικρότερος από τον δείκτη διάθλασης του περιβάλλοντος μέσου, τότε μπορούμε να πούμε ότι το σωματίδιο έχει αρνητική πολωσιμότητα. Έτσι το σωματίδιο θα απωθείται από την εστία της δέσμης, και η δύναμη βαθμίδας θα έχει κατεύθυνση προς κάποια περιοχή με μικρότερη ένταση.[3]

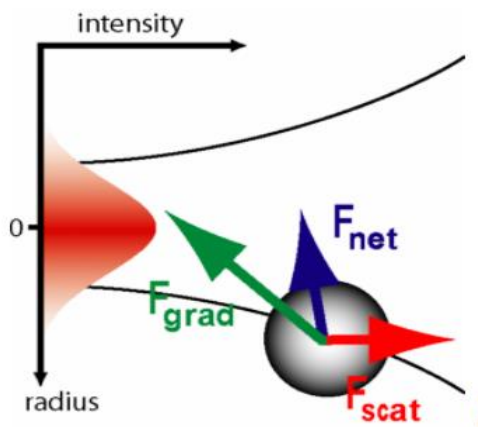


Εικόνα 2: Στην γραφική παράσταση φαίνεται ότι όσο μεγαλώνει η ισχύς της δέσμης μεγαλώνει και η δύναμη βαθμίδα. Επίσης, βλέπουμε πως ο δείκτης διάθλασης του σωματιδίου συγκριτικά με τον Δ.Δ. του μέσου αλλάζει τον προσανατολισμό της δύναμης βαθμίδα. [89]

Κάπου εδώ αξίζει να τονιστεί ξανά ότι παρόλο που αναφερόμαστε σε δυο διαφορετικές δυνάμεις (τη δύναμη σκέδασης και την δύναμη βαθμίδα) και οι δυο έχουν την ίδια προέλευση που είναι η πίεση ακτινοβολίας. Ουσιαστικά είναι οι 2 συνιστώσες της οπτικής δύναμης που ασκείται συνολικά στο σωματίδιο.



Εικόνα 3: Βλέπουμε ένα σωματίδιο το οποίο είναι μετατοπισμένο από τον κεντρικό άξονα της δέσμης. Η δέσμη δεν είναι ισχυρά εστιασμένη και η δύναμη βαθμίδα είναι κάθετη με τον άξονα διάδοσης της δέσμης. Η διεύθυνση της δύναμης σκέδασης είναι ίδια με την διεύθυνση διάδοσης της δέσμης.



Εικόνα 4. Η δέσμη είναι ισχυρά εστιασμένη και έτσι η δύναμη βαθμίδας έχει κατεύθυνση προς την εστία της δέσμης. Αυτή τη φορά δεν είναι κάθετη στον άξονα διάδοσης της δέσμης όπως στην Εικόνα 3.

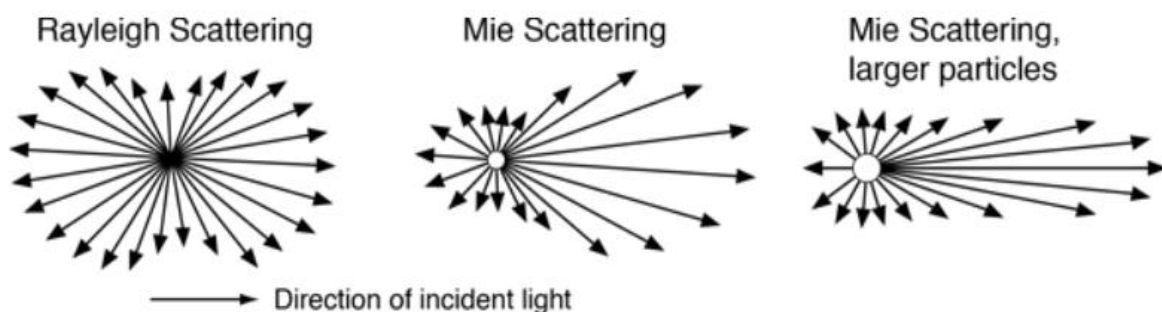
Συνήθως η δύναμη σκέδασης είναι αυτή που υπερτερεί της δύναμης βαθμίδας και έτσι το σωματίδιο κινείται προς την κατεύθυνση διάδοσης τους φωτός. Για να επιτευχθεί η οπτική παγίδευση θα πρέπει η δύναμη βαθμίδας να είναι ίση ή μεγαλύτερη από την δύναμη σκέδασης, έτσι ώστε να “τραβάει” το σωματίδιο αντίθετα από την διεύθυνση διάδοσης της δέσμης και να το παγιδεύει στην εστία της. Αυτό γίνεται με την χρήση μιας δέσμης λέιζερ η οποία «γεμίζει» την είσοδο ενός αντικειμενικού φακού με μεγάλο αριθμητικό άνοιγμα. Έτσι δημιουργείται μια απότομη βαθμίδα δυναμικού και συνεπώς μεγαλύτερη δύναμη βαθμίδας, που έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε μια πιο αποδοτική παγίδα [1]. Σε μια δέσμη λέιζερ οι ακραίες ακτίνες είναι αυτές που είναι υπεύθυνες για την δύναμη βαθμίδας, ενώ για την δύναμη σκέδασης αυτές που βρίσκονται στο κέντρο. Έτσι με την χρήση ενός συστήματος φακών που θα διευρύνουν την δέσμη έτσι ώστε να καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του

αντικειμενικού φακού, κατά την είσοδο του σε αυτό, θα έχουμε περισσότερες ακραίες ακτίνες συνεπώς και η δύναμη σκέδασης θα υπερτερεί της δύναμης βαθμίδας. [4] Για να θεωρηθεί ένα σωματίδιο ότι έχει παγιδευτεί, θα πρέπει η συνισταμένη των δυνάμεων που του ασκούνται να είναι ίσες με μηδέν και όταν μετατοπιστεί να υπάρχει μια δύναμη η οποία να το μεταφέρει στη θέση ισορροπίας. Μόνο τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το σωματίδιο έχει παγιδευτεί.[5]

1.2.1 Σκέδαση Mie & Rayleigh

Για τον καλύτερο υπολογισμό της οπτικής δύναμης θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν στους υπολογισμούς μας το μέγεθος του σωματιδίου, κάτι το οποίο δεν έχουμε συμπεριλάβει ακόμα.

Με λίγα λόγια ανάλογα με το μέγεθος του σωματιδίου και το μήκος κύματος της προσπίπτουσας δέσμης λέιζερ υπάρχουν δυο διαφορετικά θεωρητικά μοντέλα τα οποία επεξηγούν με ακρίβεια τις οπτικές δυνάμεις. Όταν το σωματίδιο έχει ακτίνα πολύ μικρότερη από το μήκος κύματος δηλ. $r \ll \lambda$, τότε το θεωρητικό μοντέλο που χρησιμοποιούμε είναι η σκέδαση Rayleigh, ενώ αν $r \gg \lambda$ τότε οι υπολογισμοί βασίζονται στην σκέδαση Mie.



Εικόνα 5: Μοτίβα σκέδασης του φωτός ανάλογα με το μέγεθος του σωματιδίου

ΣΚΕΔΑΣΗ RAYLEIGH

Το θεωρητικό μοντέλο της σκέδασης Rayleigh χρησιμοποιείται όταν η ακτίνα r του σωματιδίου έχει μέγεθος $r < 0.1 \cdot \lambda$ όπου λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας [5]. Στην περίπτωση αυτή, το φως δεν μπορεί να θεωρηθεί ως κύμα αλλά ως ανομοιογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο το οποίο πολώνει το σωματίδιο και το κάνει να συμπεριφέρεται σαν δίπολο, (συγκεκριμένα σαν Hertzian dipole). Για τον υπολογισμό των δυνάμεων που ασκούνται στο παγιδευμένο σωματίδιο είναι απαραίτητο να επιλυθούν οι εξισώσεις του Maxwell με τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες ανάλογα με το εκάστοτε πρόβλημα.[6]. Μια απλή αλλά αναλυτική λύση του προβλήματος μπορεί να εξαχθεί κάνοντας την προσέγγιση ότι το ηλεκτρικό πεδίο είναι ομοιόμορφα κατανομημένο στο σφαιρικό Rayleigh σωματίδιο[7]. Κάπως έτσι προκύπτει ότι η εξίσωση της επαγόμενης διπολικής ροπής του σωματιδίου είναι η εξής:

$$\alpha = 4\pi\epsilon_{med}r^3 \left(\frac{m^2-1}{m^2+2}\right) \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = 4\pi n_{med}^2 \epsilon_0 r^3 \left(\frac{m^2-1}{m^2+2}\right) \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \quad (1.17)$$

Όπου n_{med} : ο δείκτης διάθλασης του μέσου που γίνεται η παγίδευση

ϵ_{med} : ηλεκτρική επιδεκτικότητα (electric permittivity) του μέσου.

r : η ακτίνα του σωματιδίου (d : η διάμετρος του)

$$m = n_p / n_{med}$$

n_p : ο δείκτης διάθλασης του σωματιδίου

Η δύναμη βαθμίδας ορίζεται ως εξής: [8]

$$\begin{aligned} F_{grad} &= \frac{1}{2} \alpha \nabla \mathbf{E}^2(\mathbf{r}, t) = \pi n_{med}^2 \epsilon_0 r^3 \left(\frac{m^2-1}{m^2+2}\right) \nabla |E(\mathbf{r})|^2 \\ &= \frac{\pi n_{med}^2 \epsilon_0 r^3}{c} \left(\frac{m^2-1}{m^2+2}\right) \nabla I(\mathbf{r}) \quad (1.18) \end{aligned}$$

Για την πιο πάνω σχέση της δύναμης βαθμίδας έχουμε ορίσει ότι $\mathbf{E}^2(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2} |E(\mathbf{r})|^2$ (1.19) και

$$I(\mathbf{r}) = \hat{z} \frac{n_{med} \epsilon_0 c}{2} |E(\mathbf{r})|^2 \quad (1.20).$$

Η δύναμη σκέδασης στη συγκεκριμένη προσέγγιση ορίζεται ως : [9]

$$F_{scat} = P_{scat} / c = \frac{n_{med} \cdot I_0}{c} \sigma_s \quad (1.21)$$

όπου P_{scat} είναι η σκεδαζόμενη ισχύς Rayleigh ενώ σ_s είναι η ενεργός διατομή σκέδασης Rayleigh που ισούται με $\sigma_s = \frac{2\pi^5}{3} \cdot \frac{d^6}{\lambda^4} \cdot \left(\frac{m^2-1}{m^2+2}\right)^2$ [10].

Με βάση τα πιο πάνω η δύναμη σκέδασης Rayleigh μπορεί να γραφτεί εκ νέου ως

$$F_{scat} = \frac{n_{med} \cdot I_0}{c} \cdot \frac{128\pi^5 r^6}{3\lambda^4} \cdot \left(\frac{m^2-1}{m^2+2}\right)^2 \quad (1.22)$$

Στο σημείο αυτό μπορούμε να εισάγουμε και τον παράγοντα Q. Πρόκειται για μια αδιάστατη μεταβλητή η οποία εκφράζει την αποτελεσματικότητα της παγίδας.[11]

$$Q = \frac{c F_{trap}}{n_{med} \cdot P} \quad (1.23) \quad F_{trap}: \text{η ολική δύναμη της παγίδας}$$

P: η ισχύς της δέσμης laser.

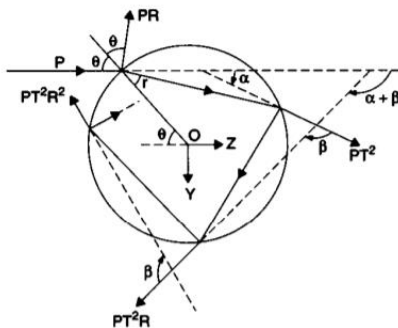
ΣΚΕΔΑΣΗ ΜΙΕ

Για να χρησιμοποιήσουμε το θεωρητικό μοντέλο της σκέδασης Mie θα πρέπει το σωματίδιο να έχει μέγεθος μεγαλύτερο του μήκος κύματος ($d \gg \lambda$). Σε αυτή λοιπόν την περίπτωση παύουμε πλέον να θεωρούμε το laser σαν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, αλλά το αντιμετωπίζουμε σαν ένα σύνολο από πολλές παράλληλες ακτίνες με την κατάλληλη ένταση και πόλωση, οι οποίες διαδίδονται ευθύγραμμα και παράλληλα μέσα σε ένα ομοιογενές μέσο με δείκτη διάθλασης n. Η κάθε ακτίνα ξεχωριστά όταν φτάσει στο διηλεκτρικό σωματίδιο που θεωρούμε ότι είναι σφαιρικό, μπορεί να ανακλαστεί ή να διαθλαστεί αλλάζοντας κατεύθυνση ακολουθώντας πάντα τις εξισώσεις Fresnel. Η διάθλαση όμως μιας ακτίνας φωτός στην επιφάνεια του σωματιδίου έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά ορμής στο σωματίδιο συνεπώς και την άσκηση κάποιας δύναμης.

Με βάση την πιο πάνω θεωρία θα υπολογιστούν οι δυνάμεις που ασκούνται στο σωματίδιο από ξεχωριστές ακτίνες με ισχύ P και γωνία πρόσπτωσης θ της ακτίνας ως προς την επιφάνεια της σφαίρας. Η συνολική δύναμη που ασκείται σε ένα σφαιρικό σωματίδιο περιλαμβάνει το άθροισμα όλων των επιμέρους ανακλώμενων ακτινών με ισχύ PR, και των διαθλώμενων ακτινών με διαδοχικά μειωμένη ισχύς PT^2R^m $m=0,1,2,\dots$ όπου R και T είναι οι συντελεστές ανάκλασης και διάδοσης Fresnel στην επιφάνεια υπό γωνία θ . Το τελικό αποτέλεσμα της δύναμης είναι: [12]

$$|F| = |Q| n_m \cdot P / c \quad (1.24) \quad \text{όπου } n_m: \text{ο δείκτης διάθλασης του μέσου διάδοσης}$$

Q: η απόδοση της παγίδας η οποία εξαρτάται από τους συντελεστές R & T.



Εικόνα 6: Η γεωμετρία με βάση την οποία θα υπολογιστεί η δύναμη που ασκεί η σκεδαζόμενη δέσμη με ισχύ P σε μια διηλεκτρική σφαίρα. Παρατηρείται και η ανακλώμενη δέσμη PR καθώς και οι άπειρες ανακλάσεις PT^2R^m

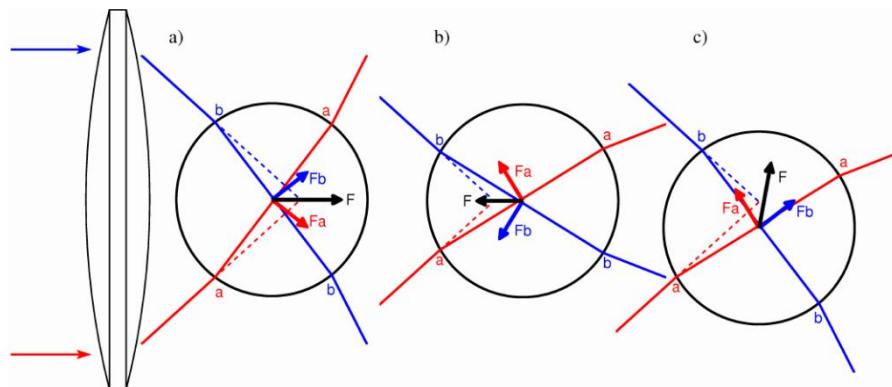
Όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω η δύναμη F είναι το άθροισμα των δυνάμεων F_a και F_b που έχουν προκύψει από την διάθλαση και διάδοση της ακτίνας laser. Έχει γίνει όμως και η παραδοχή με σκοπό την απλοποίηση του προβλήματος ότι στην επιφάνεια του σωματιδίου η ανάκλαση είναι μηδενική.

Η συνολική δύναμη F που έχει αναφερθεί πιο πάνω μπορεί να αναλυθεί σε 2 συνιστώσες F_y και F_z . Η F_z ταυτίζεται με τη δύναμη σκέδασης και F_y με τη δύναμη βαθμίδας και μπορούν να γραφτούν με αναλυτική μορφή όπως πιο κάτω [9]

$$F_z = F_s = \frac{n_{med}P}{c} \left\{ 1 + R \cos 2\theta - \frac{T^2 [\cos(2\theta - 2r) + R \cos 2\theta]}{1 + R^2 + 2R \cos 2r} \right\} \quad (1.25)$$

$$F_y = F_g = \frac{n_{med}P}{c} \left\{ R \sin 2\theta - \frac{T^2 [\sin(2\theta - 2r) + R \sin 2\theta]}{1 + R^2 + 2R \cos 2r} \right\} \quad (1.26)$$

Στις πιο πάνω εξισώσεις παρατηρούμε τις μεταβλητές θ και r που αποτελούν τις γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης όπως φαίνονται και στην Εικόνα 6. Για να προκύψει σχέση για την ολική F αρκεί να διευκρινίσουμε ότι $F = \sqrt{F_s^2 + F_g^2} = Q \frac{n_m \cdot P}{c}$ και εννοείται ότι $Q = \sqrt{Q_s^2 + Q_g^2}$



Εικόνα 7: Ποιοτική παρουσίαση της παγίδευσης διηλεκτρικών σφαιρών. Η διάθλαση των ακτίνων a και b μας δίνει τις δυο δυνάμεις F_a και F_b . Η συνισταμένη των δυο δυνάμεων F επαναφέρει το σωματίδιο στην εστία παγίδευσης, όταν αυτό έχει υποστεί αξονική ή και εγκάρσια μετατόπιση.

1.2.2 Υπολογισμός της οπτικής δύναμης μέσω του τανυστή τάσης Maxwell (Maxwell stress tensor - MST).

Μια προσέγγιση στην οποία δεν έχουμε αναφερθεί ακόμα, για τον υπολογισμό των οπτικών δυνάμεων είναι αυτή με την χρήση του τανυστή τάσης Maxwell. Η προσέγγιση αυτή εφαρμόζεται όταν το μέγεθος του σωματιδίου είναι συγκρίσιμο με το μήκος κύματος της δέσμης laser $r \sim \lambda$.

Η συνολική μηχανική δύναμη που ασκείται σε έναν όγκο εξαιτίας ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μπορεί να υπολογιστεί μέσω του ταυστή του Maxwell (Maxwell's stress tensor). Η δύναμη ανα μονάδα όγκου δίνεται από την σχέση

$$\vec{f} = \rho \vec{E} + \vec{J} \times \vec{B}$$

Αντικαθιστώντας τις κατάλληλες εξισώσεις του Maxwell, προκύπτει η εξής εξίσωση:

$$\vec{f} = \epsilon_0 (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) \vec{E} + \left[\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{B} - \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right] \times \vec{B}$$

Από το νόμο του Faraday γνωρίζουμε ότι: $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\vec{\nabla} \times \vec{E}$

Όπως επίσης ξέρουμε ότι $\frac{\partial}{\partial t} (\vec{E} \times \vec{E}) = \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \times \vec{B} \right) + \left(\vec{E} \times \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right)$.

Από τον συνδυασμό των δυο πιο πάνω εξισώσεων προκύπτει η εξής εξίσωση:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \times \vec{B} = \frac{\partial}{\partial t} (\vec{E} \times \vec{B}) + \vec{E} \times [\vec{\nabla} \times \vec{E}]$$

Στη συνέχεια αντικαθιστώντας την (3.5) στην (3.1) έχουμε

$$\vec{f} = \epsilon_0 [(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) \vec{E} - \vec{E} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E})] - \frac{1}{\mu_0} [\vec{B} \times (\vec{\nabla} \times \vec{B})] - \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\vec{E} \times \vec{B})$$

Για να απλοποιηθεί η μορφή της πιο πάνω εξίσωσης προσθέτουμε τον όρο $(\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) \vec{B}$ ο οποίος δεν αλλάζει κάτι στην εξίσωση αφού ισούται με μηδέν. Επίσης αντικαθιστούμε και τις πιο κάτω ταυτότητες.

$$\vec{E} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \frac{1}{2} \vec{\nabla} (E^2) - (\vec{E} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{E}$$

$$\vec{B} \times (\vec{\nabla} \times \vec{B}) = \frac{1}{2} \vec{\nabla} (B^2) - (\vec{B} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{B}$$

Άρα η εξίσωση μεταποιείται ως εξής:

$$\vec{f} = \epsilon_0 [(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) \vec{E} + (\vec{E} \cdot \vec{\nabla}) \vec{E}] + \frac{1}{\mu_0} [(\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) \vec{B} + (\vec{B} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B}] - \frac{1}{2} \vec{\nabla} \left(\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right) - \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\vec{E} \times \vec{B})$$

Όπως είναι προφανές η εξίσωση έχει μια αρκετά περίπλοκη μορφή. Για να απλοποιηθεί θα εισάγουμε τον ταυστή ηλεκτρομαγνητικής τάσης του Maxwell, ο οποίος ορίζεται με τον πιο κάτω τρόπο.

$$T_{ij} = \varepsilon_0 \left(E_i E_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} E^2 \right) + \frac{1}{\mu_0} \left(B_i B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} B^2 \right)$$

Τελικά η συνολική δύναμη που ασκείται σε έναν όγκο V είναι το επιφανειακό ολοκλήρωμα της δύναμης πάνω στον όγκο, άρα:

$$\vec{F} = \oint_S \vec{T} d\vec{a} - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{d}{dt} \int_V \vec{S} d\tau$$

Στην πιο πάνω σχέση το \vec{S} είναι το διάνυσμα Poynting [13], και ο δεύτερος όρος υποδηλώνει την εξάρτηση που έχει το πρόβλημα στον χρόνο. Στην δική μας περίπτωση όπου το πρόβλημα είναι χρονοανεξάρτητο εκείνος ο όρος διαγράφεται, και έτσι η δύναμη μπορεί να εκφραστεί εξ'ολοκλήρου με την χρήση του ταυυστή τάσης Maxwell, πάνω στην επιφάνεια που περικλείει τον όγκο του σωματιδίου.

Ο ταυυστής τάσης ουσιαστικά εκφράζει την δύναμη ανά μονάδα εμβαδού που ασκείται σε μια στοιχειώδη επιφάνεια, κάτι το οποίο ισοδυναμεί με πίεση. Βλέποντας τον συμβολισμό του ταυυστή T_{ij} παρατηρούμε τους δείκτες ij που υπάρχουν. Ο δείκτης i υποδηλώνει την κατεύθυνση της δύναμης ανά μονάδα εμβαδού ενώ το j δείχνει τον προσανατολισμό της επιφάνειας.

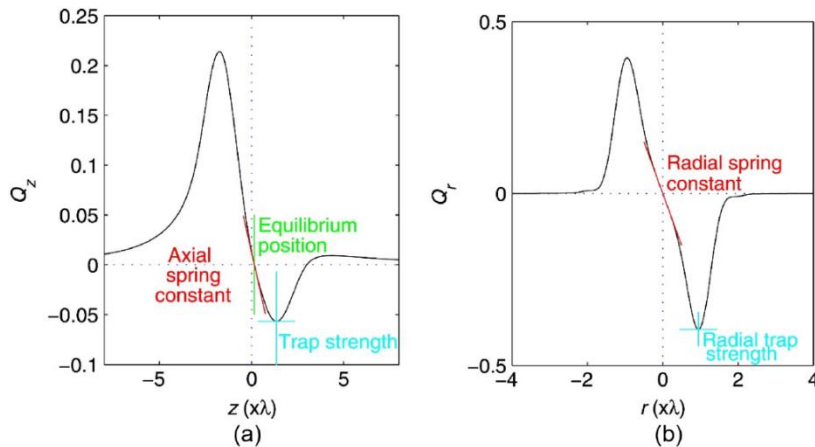
Ειδικότερα για οι συνιστώσες T_{xx}, T_{yy}, T_{zz} είναι οι κάθετες τάσεις που ασκούνται στην επιφάνεια, ενώ οι T_{xy}, T_{xz} κτλ ονομάζονται διατμητικές τάσεις.

Κατά την μοντελοποίηση μιας οπτικής παγίδας το πιο σημαντικό έργο είναι ο υπολογισμός της οπτικής δύναμης που ασκείται στο παγιδευμένο σωματίδιο από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της δέσμης laser. Οι πιο σημαντικές ιδιότητες που περιγράφουν μια οπτική παγίδα είναι οι εξής[3] :

- Η δύναμη της παγίδας: η οποία θεωρείται η μικρότερη μέγιστη δύναμη η οποία θα κρατήσει το σωματίδιο μέσα στην παγίδα. Η δύναμη αυτή είναι διαφορετική στις διάφορες κατευθύνσεις από την θέση ισορροπίας του σωματιδίου μέσα στην παγίδα. Το σωματίδιο είναι πιο πιθανόν να διαφύγει εκεί που η μέγιστη δύναμη είναι πιο αδύναμη. Η πιο συνηθισμένη περίπτωση είναι κατά μήκος του άξονα διάδοσης της δέσμης, όπου εκεί υπάρχει η δύναμη σκέδασης η οποία «σπρώχνει» το σωματίδιο να βγει έξω από την παγίδα.
- Η ακτινική δύναμη της παγίδας: πρόκειται για την μέγιστη δύναμη επαναφοράς που θα κρατήσει το σωματίδιο μέσα στην παγίδα που δρα ενάντια σε οποιαδήποτε ακτινική μετατόπιση από την θέση ισορροπίας.
- Η θέση ισορροπίας: είναι η θέση στην οποία η συνισταμένη οπτική δύναμη είναι ίση με μηδέν, και η ισορροπία είναι σταθερή. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει πάντα θέση ισορροπίας, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση που η δέσμη έχει προφίλ Laguerre-Gauss και το σωματίδιο παγιδεύεται μέσα στην δέσμη που έχει σχήμα δαχτυλιδιού και εκεί περιστρέφεται γύρω από τον άξονα της δέσμης.[14], [15]
- Η ακτινική σταθερά του ελατηρίου: είναι ο βαθμός της αύξησης της δύναμης επαναφοράς με την αλλαγή της ακτινικής απόστασης. Συνήθως η απόσταση καθορίζεται από την θέση

ισορροπίας, η οποία θεωρείται το σημείο αναφοράς και συνήθως μοντελοποιείται όπως ένα γραμμικό ελατήριο δηλ. από τη σχέση $F = -k \cdot r$.

- Η αξονική σταθερά ελατηρίου: είναι κάτι αντίστοιχο με την ακτινική σταθερά ελατηρίου απλά αναφερόμαστε στην αξονική απόσταση. Δεν είναι τόσο σημαντική όσο η ακτινική σταθερά του ελατηρίου και δεν είναι τόσο ευρέως χρησιμοποιημένη στις πειραματικές μετρήσεις της δύναμης.



Εικόνα 8: Παρατηρούμε τη σχέση της αξονικής (a) δύναμης & της ακτινικής δύναμης (b) με την μετατόπιση από τη θέση ισορροπίας, στην περίπτωση που έχουμε σωματίδιο Rayleigh. Με βάση αυτή τη γραφική παράσταση μπορούμε να υπολογίσουμε τις ιδιότητες της παγίδας που αναφέρθηκαν πιο πάνω.

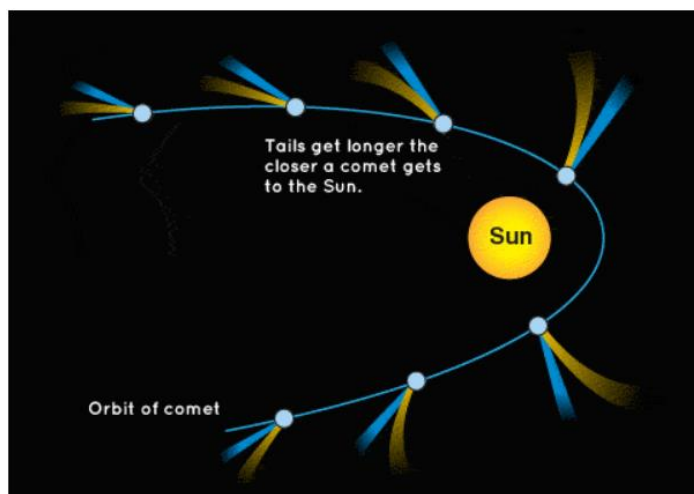
Η σταθερά του ελατηρίου που αναφέρθηκε πιο πάνω, προφανώς δεν αναφέρεται σε κάποιο ελατήριο, αλλά στον τρόπο που η δύναμη επαναφοράς τραβάει το σωματίδιο στην εστία, δηλαδή στη θέση ισορροπίας.

Στην περίπτωση της οπτικής παγίδευσης η σταθερά k που εμφανίζεται στην εξίσωση $F = -k \cdot x$ είναι η σταθερά ακαμψίας. Η σταθερά αυτή χαρακτηρίζει πόσο ισχυρή είναι μια παγίδα, γι' αυτό και στο πιο κάτω κείμενο μπορούμε να αναφερθούμε στο k και ως «ισχύς της παγίδας».

1.3 Ιστορική Αναδρομή

Η οπτική παγίδευση με τη χρήση δέσμης λέιζερ ανακαλύφθηκε από τον Αμερικανό επιστήμονα Arthur Ashkin το 1986. Βεβαίως ο δρόμος για να γίνει η ανακάλυψη αυτή ήταν αρκετά μακρύς, με διάφορα άλλα πειράματα και θεωρίες να έχουν θέσει τα θεμέλια.

Αρχικά το γεγονός ότι το φως μπορεί να ασκήσει δυνάμεις σε σωματίδια ήταν γνωστό από πολύ παλιά, περίπου από το 1619. Ο Johannes Kepler ο οποίος ήταν γνωστός αστρονόμος της εποχής είχε παρατηρήσει ότι οι ουρές σκόνης των κομητών έχουν πάντα ακτινική διεύθυνση σε σχέση με τον ήλιο ανεξαρτήτως της κατεύθυνσης του κομήτη. Η επιστημονική εξήγηση για το φαινόμενο αυτό είναι η πίεση ακτινοβολίας, που ασκείται από τα φωτόνια που εκπέμπονται από τον ήλιο στη σκόνη που αφήνει ο κομήτης. Η ακτινοβολία του ήλιου ουσιαστικά «σπρώχνει» τα σωματίδια σκόνης της ουράς του κομήτη [16][17].



Εικόνα 9: Παρουσιάζεται η διεύθυνση των ουρών (dust tail με μπλε χρώμα και gas tail με κίτρινο χρώμα) ενός κομήτη ο οποίος πλησιάζει τον ήλιο

Η πιο πάνω εικόνα μας βοηθά να καταλάβουμε καλύτερα την διεύθυνση των ουρών του κομήτη. Αρχικά το μήκος της ουράς μεγαλώνει όσο ο κομήτης πλησιάζει στον ήλιο. Επίσης η μπλε ουρά η οποία είναι η «dust tail» βλέπουμε ότι έχει διεύθυνση ακτινική ως προς τον ήλιο και πάντα απομακρύνεται από αυτόν. Η ουρά που είναι με κίτρινο χρώμα είναι η λεγόμενη «gas tail» (ουρά ιόντων) και η διεύθυνση της ορίζεται από τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου του ηλιακού ανέμου.

Το 1873 ο James Clerk Maxwell έδωσε μια ποσοτική εξήγηση των οπτικών δυνάμεων με βάση τη δική του ηλεκτρομαγνητική θεωρία. Σύμφωνα λοιπόν με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell η ροή της ορμής μιας δέσμης φωτός θα είναι ανάλογη με την ένταση της και θα μπορούσε να μεταφερθεί σε σωματίδια. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα να δημιουργηθεί πίεση ακτινοβολίας, η οποία θα μπορούσε να παρασύρει σωματίδια κατά τον άξονα διάδοσης της δέσμης φωτός. Αργότερα, ο Ρώσος φυσικός Pyotr Nikolaevich Lebedev ήρθε να επιβεβαιώσει και πειραματικά τη θεωρία που είχε εκφράσει ο Maxwell. Ο Lebedev στο πείραμα του είχε τοποθετήσει έναν καθρέφτη που ήταν συνδεδεμένος με ζυγό στρέψης και είχε εστιάσει πάνω του το φως από μια λάμπα. Και κάπως έτσι παρατήρησε τον ζυγό στρέψης να μετακινείται από την θέση ισορροπίας. [18]

Δυστυχώς όμως είχε προκύψει ένα αρκετά σημαντικό πρόβλημα. Οι οπτικές δυνάμεις που είχαν μετρηθεί ήταν αρκετά μικρές, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει κάποια προφανής εφαρμογή για τις οπτικές δυνάμεις. Είχαν πειστεί ότι δυνάμεις αυτής της τάξης μεγέθους θα μπορούσαν να έχουν κάποια εφαρμογή μόνο στο διάστημα, όπου η ένταση του φωτός είναι πολύ πιο μεγάλη και η επίδραση της βαρύτητας είναι σχεδόν μηδαμινή.

Το 1960 όταν πλέον είχε ανακαλυφθεί το laser δόθηκε νέος αέρας και νέες προοπτικές στις οπτικές δυνάμεις και όχι μόνο. Τα laser είχαν πολλά χρήσιμα χαρακτηριστικά που θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην οπτική παγίδευση, όπως για παράδειγμα η μεγάλη ένταση της δέσμης όπως και η απότομη βαθμίδα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Ο δρόμος ήταν πλέον ανοικτός για να δημιουργηθούν δυνάμεις αρκετά ισχυρές που να είναι ικανές να χειριστούν και να παγιδεύσουν διάφορα σωματίδια (από άτομα μέχρι και μικροοργανισμούς) [19]. Έτσι το 1960 ο Ashkin ξεκίνησε να πραγματοποιεί τα πειράματά του με τα νέα πλέον δεδομένα. Γνώριζε όμως ότι ακόμα και μια

μέτρια απορρόφηση φωτός από το σωματίδιο θα ήταν αρκετή για να δημιουργήσει ανεπιθύμητη θέρμανση του στόχου. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο είχε χρησιμοποιήσει διαφανή μικροσφαιρίδια από latex μέσα σε νερό, και με την χρήση ενός laser αργού κατάφερε να επιβεβαιώσει αυτό που του έλεγαν ήδη οι υπολογισμοί του. Ότι δηλαδή υπήρχε μια δύναμη που έσπρωχνε τα σωματίδια κατά την διεύθυνση του άξονα διάδοσης της δέσμης με την ταχύτητα που είχε ήδη υπολογίσει. Παρόλα αυτά παρατήρησε και κάτι αρκετά αναπάντεχο. Σωματίδια που βρίσκονταν περιφερειακά απ' την δέσμη ωθούνταν προς το κέντρο της δέσμης δηλαδή προς την εστία. Έτσι, ήταν η αρχή να διερευνηθεί περισσότερο τη δύναμη βαθμίδας. Ο Arthur Ashkin το 1970 έκανε την πρώτη του δημοσίευση [20], σχετικά με την επιτάχυνση και παγίδευση σωματιδίων με την χρήση της πίεσης ακτινοβολίας. Στη συγκεκριμένη δημοσίευση είχε εξηγήσει την επιτάχυνση ουδέτερα φορτισμένων σωματιδίων με την χρήση οπτικών δυνάμεων καθώς και την παγίδευση τους με την χρήση εστιασμένων δεσμών laser. Επίσης, ανακάλυψε ότι η οπτική δύναμη αποτελείται από 2 διαφορετικές συνιστώσες: την δύναμη βαθμίδας και την δύναμη σκέδασης.

Τέλος το πιο εντυπωσιακό στη συγκεκριμένη δημοσίευση δεν ήταν απλά οι νέες ανακαλύψεις από φυσικής άποψης αλλά κυρίως οι νέες προοπτικές που ξεδιπλώνονταν για την χρήση των οπτικών δυνάμεων και της οπτικής παγίδευσης.

Το 1986 ο A. Ashkin ανέφερε για πρώτη φορά αυτό που εμείς σήμερα αναφέρουμε ως optical tweezers, δηλαδή την παγίδευση micro-σωματιδίων με την χρήση ισχυρά εστιασμένης δέσμης λέιζερ και στις τρεις διαστάσεις. Στο πείραμα του ο A. Ashkin χρησιμοποίησε μικροσφαιρίδια σιλικόνης (silica), ενώ στην συνέχεια χρησιμοποίησε και διηλεκτρικά σφαιρίδια μεγέθους μέχρι και 10μm. [21] Για να καταφέρει μια δέσμη λέιζερ να παγιδεύσει σταθερά ένα σωματίδιο και στις 3 διαστάσεις, θα έπρεπε να υπάρχει μια δύναμη αντίθετη με την δύναμη σκέδασης, η οποία θα "τραβούσε" το σωματίδιο προς τα πίσω. Ο Ashkin αντιλήφθηκε ότι αυτή η δύναμη ήταν η δύναμη βαθμίδας, με την προϋπόθεση ότι η αξονική βαθμίδα δυναμικού θα ήταν πολύ απότομη. Αυτό επιτεύχθηκε με την χρήση ενός laser αργού το οποίο περνούσε μέσα από ένα μικροσκόπιο με φακό μεγάλου αριθμητικού ανοίγματος, για να δημιουργεί μια ισχυρή εστία δέσμης φωτός που θα τραβούσε και θα παγίδευε οποιοδήποτε σωματίδιο βρισκόταν αρκετά κοντά.

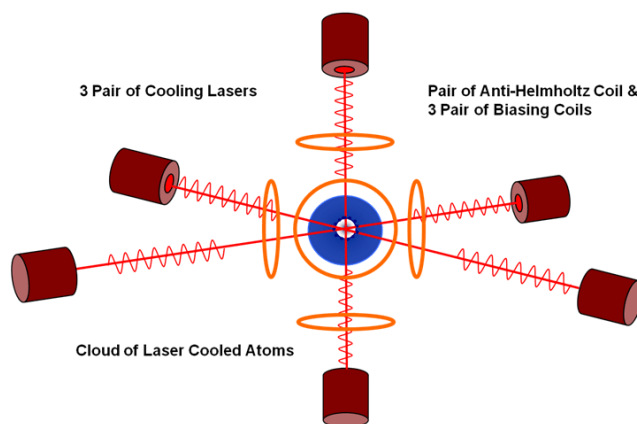
Με βάση αυτό ο A. Ashkin εξέλιξε τις ιδέες του και προχώρησε στην οπτική παγίδευση βιολογικών δειγμάτων όπως ιών, μακρομορίων, πολυμερών κτλ. Βεβαίως αυτό δεν επιτεύχθηκε αμέσως, αλλά προηγήθηκαν αρκετές αποτυχίες και λάθη, όπως για παράδειγμα πολλά κύτταρα είχαν πεθάνει ή καταστραφεί κάτω από την επίδραση μιας δέσμης με μεγάλη ισχύ. Αυτό όμως δεν ήταν επιθυμητό καθώς σκοπός ήταν η οπτική λαβίδα να χρησιμοποιηθεί σε ζωντανά δείγματα. Γι' αυτό και το laser αργού αντικαταστάθηκε με ένα υπεριώδες laser το οποίο δεν είχε μεγάλη απορρόφηση από τα βιολογικά δείγματα, έτσι δεν υπήρχε και μεγάλη θέρμανση των βιολογικών υλικών. Έτσι, σε συνεργασία με τους J. M. Dziedzic και T. Yamane ο A. Ashkin το 1987 κατάφερε να παγιδεύσει βακτήρια για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς να παρατηρηθεί κάποια βλάβη στο κύτταρο. [22]

Η έρευνα προχώρησε και με την παγίδευση άλλων κυττάρων όπως για παράδειγμα ανθρώπινα ερυθροκύτταρα, αμοιβάδες, πρωτόζωα. Με αυτό τον τρόπο ανακαλύφθηκε ότι μπορούσαν να παγιδευτούν ακόμα και κυστίδια και οργανίδια που βρίσκονται μέσα στο κύτταρο. Το 1987 ο A. Ashkin με τον J. M. Dziedzic παρουσιάζουν για την έρευνα τους σχετικά με την παγίδευση και τον χειρισμό κυτταρικών δομών και κυτταροπλάσματος τα οποία παρουσίαζαν ιξωδοελαστική συμπεριφορά, πιο συγκεκριμένα τα κύτταρα αυτά συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά ενός ελαστικού στερεού με χαρακτηριστικά ενός ιξώδους ρευστού. [23]

Βεβαίως, στη συνέχεια ακολούθησαν λαμπρές ανακαλύψεις αφού αυτά που έχω προαναφέρει ήταν μόνο η αρχή της χρήσης αυτής της πολλά υποσχόμενης τεχνικής. Όπως για παράδειγμα ο Block το 1989 δημιούργησε για πρώτη φορά μια τεχνική υπολογισμού των βιολογικών δυνάμεων με την χρήση optical tweezers, όπου μετρούσε την δύναμη των μαστίγιών των βακτηρίων E-coli και του στρεπτόκοκκου που χρησιμοποιούν για να κινούνται .[24]

Με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη της τεχνολογίας είχαμε νέες πειραματικές διατάξεις οπτικών λαβίδων, οι οποίες βελτίωσαν τις προϋπάρχουσες διατάξεις και διευκόλυναν την έρευνα των επιστημόνων. Τρανό παράδειγμα είναι η καθοδήγηση δέσμης laser μέσα από μονοτροπική ίνα. Η μέθοδος αυτή υλοποιήθηκε το 1993 από τον A. Constable και τους συνεργάτες του [25] και είχε ως αποτέλεσμα να είναι πολύ πιο εύκολη η αλλαγή οργάνων στην πειραματική διάταξη καθώς και η μετακίνηση του δείγματος.

Ένας από τους συνεργάτες του A. Ashkin ο Steven Chu χρησιμοποίησε την τεχνική των optical tweezers στα δικά του ακαδημαϊκά ενδιαφέροντα που σχετίζονταν με το cooling και trapping ουδέτερα φορτισμένων ατόμων. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα ο S. Chu μαζί με τον Claude Cohen-Tannoudji και τον William D. Phillips να κερδίσουν το βραβείο Nobel Φυσικής το 1997 για την έρευνα και την συνεισφορά τους σχετικά με το laser cooling και διάφορες τεχνικές παγίδευσης. Το laser cooling είναι μια μέθοδος στην οποία με την χρήση 6 αντιδιαμετρικά τοποθετημένων δεσμών λέιζερ μπορεί η θερμοκρασία του παγιδευμένου ατόμου/μορίου να φτάσει σχεδόν στο απόλυτο μηδέν [26]. Το laser cooling είναι μια πολύ ενδιαφέρουσα τεχνική που όμως δεν θα αναφερθούμε στα πλαίσια της δεδομένης διπλωματικής εργασίας.



Εικόνα 10: Σχηματικό διάγραμμα των 6 αντιδιαμετρικών δεσμών λέιζερ, για παγίδευση ατόμων με σκοπό την ψύξη τους

Το 2001 απονεμήθηκε και στους Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle και Carl E. Wieman το Nobel φυσικής σχετικά με την έρευνα τους και την επίτευξη συμπύκνωσης Bose-Einstein με την χρήση μαγνητοπτικών παγίδων για το cooling ατόμων.[27] Βεβαίως και οι δυο ανακαλύψεις είχα βασιστεί στην έρευνα ετών που είχε προηγηθεί από τον A. Ashkin.

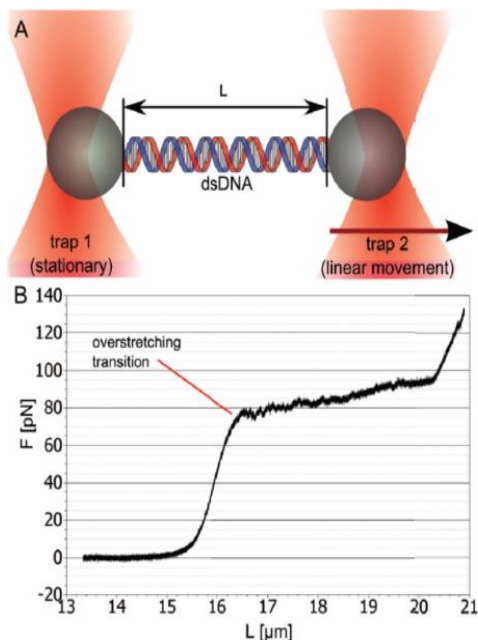
Συνοψίζοντας, η ανακάλυψη της μεθόδου της οπτικής παγίδευσης βοήθησε τους βιοφυσικούς όχι μόνο να χειριστούν βιομόρια όπως πρωτεΐνες και DNA, αλλά και να μετρήσουν με μεγάλη ακρίβεια κίνηση, ταχύτητα και δυνάμεις καθώς βρισκόνταν σε μοριακή κλίμακα.

Φυσικά, η χρησιμότητα της οπτικής παγίδευσης δεν περιορίστηκε μόνο σε βιοφυσικές εφαρμογές όπως έχουμε αναφερθεί πιο κάτω αλλά βοήθησε και σε πολλούς άλλους επιστημονικούς τομείς. Όπως για παράδειγμα τη νανοτεχνολογία [28], τη χημεία [29], τη μαλακή ύλη [30] [31], τη βιολογία [32] [33].

1.4 Εφαρμογές της οπτικής λαβίδας

Η οπτική παγίδευση είναι μια τεχνική με πάρα πολλές χρήσιμες εφαρμογές στην βιομηχανία και στην επιστήμη λόγω της μη επεμβατικής της φύσης. Έχει αποδειχθεί ένα πολύ πολύτιμο εργαλείο ειδικά στις βιοιατρικές εφαρμογές, όχι μόνο στην παγίδευση κυττάρων και μονοκύτταρων οργανισμών αλλά και στην διείσδυση σε μεγαλύτερες βιολογικές δομές για τον χειρισμό υποδομών μέσα σε αυτές.[23][34]

Τα πρώτα χρόνια μετά την ανακάλυψη της οπτικής λαβίδας είχαν καταγραφεί αμέτρητες βιολογικές μελέτες με την χρήση της τεχνικής αυτής. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η μέτρηση βιοδυνάμεων που παράγουν τα “mechanoenzymes”[35], η ακινητοποίηση κυττάρων ενώ βρίσκονταν στη φάση σύντηξης με την χρήση παλμικού υπέρυθρου laser [36], καθώς και η μελέτη της μηχανικής ευκαμψίας και των ελαστικών ιδιοτήτων του DNA. [37][38][39]



Εικόνα 11 Α) Παγίδευση μιας διπλόκλωνης έλικας dsDNA. Η παγίδευση γίνεται με την χρήση σφαιριδίων τα οποία έχουν κολληθεί στα άκρα της έλικας, και 2 διαφορετικών δεσμών λέιζερ. Μετακινώντας την μια παγίδα μια δύναμη ασκείται στο βιομόριο. Από την απόσταση των 2 παγίδων και την μετατόπιση των σφαιριδίων μπορεί να υπολογιστεί το μήκος L του DNA. Ο υπολογισμός της δύναμης μας βοηθά να κατανοήσουμε την σχέση δύναμης-επιμήκυνσης του μορίου DNA.

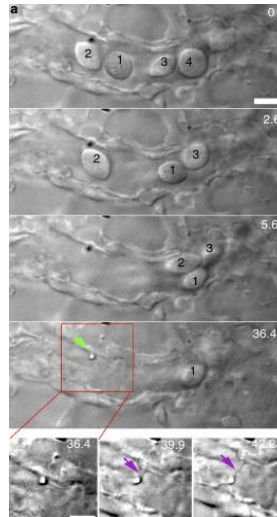
Β) Η γραφική παράσταση της δύναμης ως συνάρτηση της επιμήκυνσης για ένα μόριο DNA με μήκος $L_0 = 16\mu\text{m}$. Όταν το DNA τεντωθεί πολύ περισσότερο από το αρχικό του μήκος, τότε ξεκινά να διαλύεται. Το κατώφλι αυτό είναι χαρακτηριστικό για κάθε μόριο και επηρεάζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Στη συνέχεια με την εξέλιξη της τεχνολογίας τον 21^ο αιώνα εξελίχθηκαν οι και πειραματικές διατάξεις των οπτικών λαβίδων οι οποίες τώρα έχουν πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια καθώς και περισσότερους βαθμούς ελευθερίας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η οπτική παγίδευση να βρίσκει χρησιμότητα σε ευρύ πεδίο επιστημών όπως βιολογία, φυσική, χημεία (επιστήμη των κolloειδών και των αερολυμάτων) [40][41][42][43].

Μέσω της οπτικής παγίδευσης μπορούν να μας παραχθούν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την μικρο-ρεολογία, για την κατανόηση της βασικής φυσικής των ρευστών, τη βιοφυσική των κυτταρικών μεμβρανών όπως για παράδειγμα την επιφανειακή τάση και το μέτρο κάμψης.

Στη βιβλιογραφία έχουν καταγραφεί και κλινικές εφαρμογές σχετικά με την διάγνωση και θεραπεία ασθενειών όπως για παράδειγμα το έμφραγμα του μυοκαρδίου. Βέβαια τέτοιου είδους μελέτες δεν γίνονται αποκλειστικά με τη χρήση οπτικής παγίδας αλλά σε συνδυασμό με άλλες διατάξεις όπως το οπτικό νυστέρι. [44]

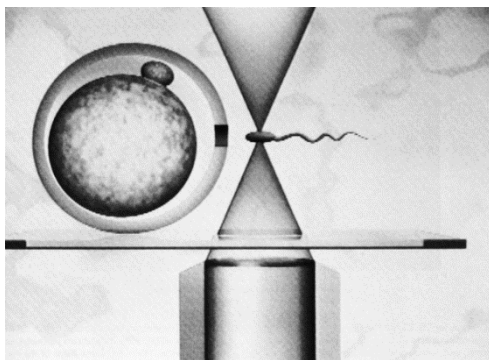
Σε μια πρόσφατη μελέτη έχει επιδειχθεί η δυνατότητα να αναγνωρίσης και επιλεκτικού χειρισμού διαφορετικών δομών πχ νανοσωματιδίων, βακτηρίων και διαφορετικών ειδών κυττάρων μέσα σε ένα ζωντανό zebrafish. Κατόπιν έγινε μελέτη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των νανοσωματιδίων και του ενδοθήλιου σε ένα περιβάλλον χωρίς καθόλου κύτταρα, αφού είχε ‘καθαριστεί’ με την οπτική παγίδα.[45]



Εικόνα 12:Με τη χρήση πολλαπλών οπτικών παγίδων γίνεται καθαρισμός μιας μικρής φλέβας, δηλαδή γίνεται απομάκρυνση των ερυθροκυττάρων από το ενδοθήλιο

Αναμφίβολα υπάρχουν τόσες πολλές προοπτικές σχετικά με τις εφαρμογές της οπτικής παγίδευσης όπως για παράδειγμα χειρισμός ζωντανών κυττάρων, η βιοφυσική ανάλυση βιομορίων, ο χαρακτηρισμός των εμβιομηχανικών που βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορους τομείς όπως την μελέτη των μοριακών κινήτρων «molecular motors» [46][47][48],στη δίπλωση και αναδίπλωση του RNA,στην ενδοκυτταρική επικοινωνία κ.α. [49], [50][51][52]

Η διαλογή κυττάρων (cell sorting) το οποίο μπορεί να γίνει μέσω τις οπτικής παγίδευσης, είναι αρκετά σημαντικό σαν εφαρμογή. Υπάρχουν πολλές κατηγορίες κυττάρων που είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός τους με σκοπό την μελέτη τους, όπως για παράδειγμα ο διαχωρισμός καρκινικών και υγιών κυττάρων, ο διαχωρισμός των κυττάρων του αίματος κτλ [53]. Άλλη μια εφαρμογή είναι η μελέτη του σπέρματος με σκοπό την in-vitro γονιμοποίηση.[54] [32] [33] [54].



Εικόνα 13: Οπτική Παγίδευση σπερματοζωαρίου με σκοπό την μεταφορά του κοντά στο ωάριο για την τεχνητή του γονιμοποίηση.

Ένας πολύ ενδιαφέρον τομέας της ιατρικής όπου βρίσκεται εφαρμογή η οπτική λαβίδα είναι η μελέτη των κυττάρων-δολοφόνων. Μια πολύ σύντομη περιγραφή της διαδικασίας είναι ότι με την βοήθεια της δέσμης λέιζερ γίνεται παγίδευση κυττάρων-δολοφόνων και στη συνέχεια τα κύτταρα αυτά έρχονται σε επαφή με κύτταρα-στόχους με σκοπό την μελέτη του ανοσοποιητικού συστήματος, καθώς και την αλλαγή στην μορφολογία των κυττάρων που έρχονται σε επαφή με τέτοιου είδους κύτταρα. [55][56][57]

Σε αυτό το σημείο αξίζει να διευκρινίσουμε ότι ο τρόπος παγίδευσης στις πιο πάνω εφαρμογές γίνεται με τη χρήση μικροσφαιριδίων γυαλιού ή πολυστυρενίου ακόμα και σιλικόνης. Το βιολογικό δείγμα προσκολλάτε μέσω βιοχημικών διεργασιών συνήθως και από τις δυο πλευρές του με τα μικροσφαιρίδια, τα οποία παγιδεύονται με τη χρήση διπλής οπτικής παγίδας. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι γιατί γίνεται αυτό, αρχικά λειτουργούν σαν λαβές σε πολύ μικρά δείγματα όπως DNA γίνεται καλύτερη και πιο ισχυρή παγίδευση των μικροσφαιριδίων. Μέσω της κίνησης των μικροσφαιριδίων μπορεί να

εντοπιστεί οποιαδήποτε κίνηση από το βιολογικό δείγμα, ο λόγος είναι ότι υπάρχει μεγάλη ακρίβεια στη θέση των σφαιριδίων μέσα στην παγίδα. Επιπλέον μέσω των μικροσφαιριδίων γίνεται ακριβής βαθμονόμηση της οπτικής παγίδας. [52] Συγχρόνως επειδή κάτω από την επίδραση του laser της παγίδας βρίσκεται το μικροσφαιρίδιο και όχι το ίδιο το βιολογικό δείγμα μειώνεται η πιθανότητα πιθανής θέρμανσης του βιολογικού δείγματος πχ. του ερυθροκυττάρου.[58]

Συνοψίζοντας, υπάρχουν αμέτρητες εφαρμογές της οπτικής παγίδας από την ανακάλυψη της μέχρι και σήμερα σε σχέση με την βιολογία των κυττάρων και των ζωντανών συστημάτων[59][49][60][61], την επιστήμη της μικρορροεολογίας και της βιοροεολογίας [62][63], τη νανοτεχνολογία [41][28], τις μικρο-κατασκευές ανέπαφη συναρμολόγησης κυττάρων «particle assembly» [12][64], και των βιοδυνάμεων ή βιολογικών διεργασιών που εξαρτούνται από δυνάμεις.[40][65] [66][67]

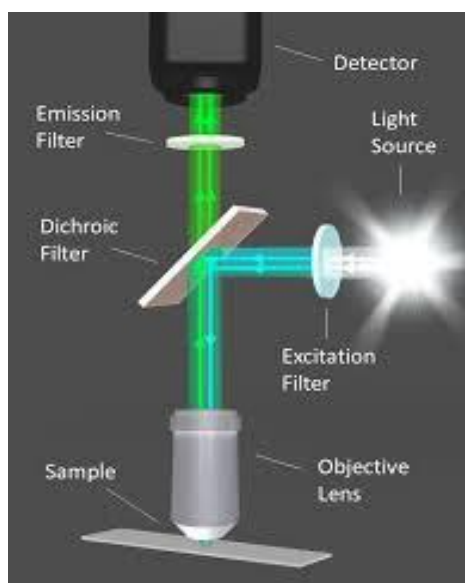
Βλέποντας όλες αυτές τις εφαρμογές της οπτικής παγίδευσης μπορεί ο καθένας να αντιληφθεί την τεράστια συνεισφορά της οπτικής λαβίδας στον κόσμο των βιολογικών επιστημών. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο το 2018 ο δημιουργός της οπτικής παγίδας Arthur Ashkin βραβεύτηκε με το μισό βραβείο του Νόμπελ φυσικής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Πειραματικές Διατάξεις οπτικών παγίδων.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έχουμε δει με λεπτομέρεια το θεωρητικό υπόβαθρο που διέπει την τεχνική της οπτικής παίδευσής καθώς και διάφορες εφαρμογές της. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί η βασική πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται για οπτική παγίδευση καθώς και οι διάφορες τεχνικές υπολογισμού της οπτικής δύναμης. Τέλος θα δούμε πιο επιγραμματικά μερικές πιο εξειδικευμένες πειραματικές διατάξεις οπτικής παγίδευσης.

2.1 Πειραματική Διάταξη μιας Οπτικής παγίδας

Η βασική πειραματική διάταξη οπτικής παγίδευσης είναι αρκετά απλή, αλλά υπάρχουν πολλοί παράγοντες οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψιν έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια λειτουργική και αποδοτική παγίδα. Βεβαίως υπάρχουν πολλές παραλλαγές της πειραματικής διάταξης της οπτικής παγίδευσης ανάλογα βέβαια και με το υπό μελέτη δείγμα. Η βασική πειραματική διάταξη αποτελείται από ένα laser, ένα μικροσκόπιο, ένα σύστημα φακών, μια κάμερα για την καταγραφή των εικόνων, καθώς και ένας Η/Υ που είναι συνδεδεμένος με την κάμερα για την αποθήκευση των πειραματικών μας αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια θα δούμε αναλυτικότερα τα σημαντικότερα όργανα που απαρτίζουν την διάταξη μας καθώς και τις προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούν.



Εικόνα 14: Βλέπουμε πως το διχρωικό κάτοπτρο ανακλά την δέσμη που προέρχεται από φωτεινή πηγή και της αλλάζει κατεύθυνση. Ταυτόχρονα όμως αφήνει να διέλθει τη δέσμη που προέρχεται από το δείγμα επιτρέποντας στον παρατηρητή να βλέπει μέσω του μικροσκοπίου το δείγμα.

Αρχικά γίνεται η οδήγηση του laser μέσω ενός κατάλληλων συστήματος φακών, το οποίο εστιάζει και απεστιάζει τη δέσμη laser ώστε να φτάσει μέσα στο μικροσκόπιο όπου εκεί θα περάσει μέσα από τον αντικειμενικό φακό έτσι ώστε να έχουμε ισχυρή εστίαση πάνω στο δείγμα ή όσο το δυνατόν πιο κοντά του. Για να καταφέρει η δέσμη να φτάσει μέχρι τον αντικειμενικό φακό θα πρέπει αρχικά να περάσει μέσα από ένα διχρωικό καθρέπτη ο οποίος είναι τοποθετημένος με κλίση 45° ως προς την κατεύθυνση της δέσμης. Το διχρωικό κάτοπτρο είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να ανακλά σχεδόν πλήρως (ανάλογα με τον κατασκευαστή μπορούμε να έχουμε και πλήρης ανάκλαση) τα φωτόνια συγκεκριμένου μήκους κύματος (το μήκος κύματος της δέσμης) ενώ αφήνει όλα τα υπόλοιπα μήκη κύματος να περνάνε. Ο λόγος που χρησιμοποιείται το συγκεκριμένο κάτοπτρο είναι πολύ απλός. Βεβαίως και επιθυμούμε να ανακλαστεί η δέσμη προς την σωστή κατεύθυνση, αλλά δεν θέλουμε να περιοριστεί και η ορατότητα μας για την παρατήρηση του δείγματος μέσω του μικροσκοπίου. Έτσι μπορούμε και να βλέπουμε και να παρατηρούμε το δείγμα αλλά και η κάμερα να καταγράφει χωρίς κάποια παρεμβολή. Τέλος με αυτό τον τρόπο έχουμε πετύχει ο άξονας διάδοσης της ακτίνας laser με τον οπτικό άξονα του αντικειμενικού φακού να είναι πλέον παράλληλοι.

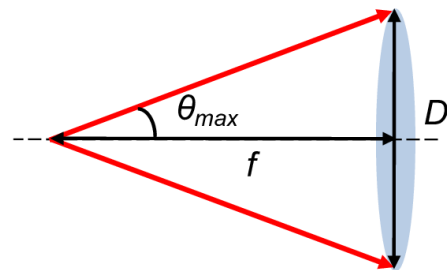
Στη συνέχεια, αφού η δέσμη μας έχει ανακλαστεί φτάνει στον αντικειμενικό φακό όπου μέσω αυτού θα εστιαστεί. Το όνομα του αντικειμενικού φακού είναι λίγο παραπλανητικό καθώς δεν αποτελείται από μόνο ένα φακό, αλλά από ένα σύνολο φακών όπως θα δούμε και σχηματικά πιο κάτω. Το πιο βασικό χαρακτηριστικό ενός αντικειμενικού φακού είναι το αριθμητικό του άνοιγμα. Το αριθμητικό άνοιγμα (NA) ενός φακού ορίζεται ως η μέγιστη γωνία με την οποία ο αντικειμενικός φακός μπορεί να δεχτεί φως από την φωτεινή πηγή.

$$NA = n \cdot \sin\theta$$

όπου

n: ο δείκτης διάθλασης του μέσου μέσα στο οποίο βρίσκεται ο φακός

θ: είναι η γωνία που σχηματίζει η οριακή ακτίνα με τον οπτικό άξονα



Εικόνα 15: Σχηματική αναπαράσταση της γωνίας θ που υπάρχει στον τύπο του μεγέθους NA

Το αριθμητικό άνοιγμα του φακού που χρησιμοποιείται σε διατάξεις οπτικής παγίδευσης επιβάλλεται να είναι αρκετά μεγάλο $NA \geq 1,00$, έτσι ώστε να έχουμε μεγιστοποίηση της βαθμίδας του φωτός κοντά στο σημείο εστίασης, και συνεπώς να έχουμε τη δημιουργία παγίδας κατά τον άξονα. Βεβαίως όσο μεγαλύτερο αριθμητικό άνοιγμα έχουμε, τόσο πιο κοντά στον φακό είναι το σημείο εστίασης της δέσμης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η απόσταση δείγματος και αντικειμενικού φακού (working distance) να είναι πολύ μικρή και δηλαδή το δείγμα μας να πρέπει να είναι πολύ κοντά στον αντικειμενικό φακό. Δυστυχώς αυτό εύκολα μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στην πειραματική μας διάταξη αφού είναι πιθανόν η working distance να είναι τόσο μικρή που ο φακός να πιέζει το δείγμα.

Ακόμα μια παράμετρος που σχετίζεται με τον αντικειμενικό φακό είναι η ενεργός διατομή της δέσμης. Θα πρέπει να ρυθμιστεί η ενεργός διατομή της δέσμης (στην περίπτωση Gaussian δέσμης είναι το $1/e^2$ της διαμέτρου) να καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια του αντικειμενικού φακού. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με την χρήση άλλων φακών, πριν η δέσμη εισέλθει στο μικροσκόπιο, είτε με την εκμετάλλευση του φυσικού ανοίγματος που θα αποκτήσει η δέσμη αν έχει διανύσει μεγάλη απόσταση.

Ο αντικειμενικός φακός αν και είναι ένα από τα πιο σημαντικά κομμάτια της πειραματικής μας διάταξης δυστυχώς είναι αυτός που προκαλεί τις μεγαλύτερες απώλειες στην ισχύς του φωτός. Γι' αυτό το γεγονός την μεγαλύτερη ευθύνη την έχουν ο κατασκευαστές, αφού οι φακοί που περιέχονται μέσα στον αντικειμενικό φακό έχουν επίστρωση από αντιανακλαστική επιφάνεια. Επειδή όμως αυτοί οι φακοί έχουν φτιαχτεί για χρήση στο ορατό φάσμα της ακτινοβολίας, εκεί δηλαδή έχουν και την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Έτσι η δική μας δέσμη laser που είναι στο κοντινό υπέρυθρο, υπόκειται σε έντονη εξασθένηση της τάξης του 25-50%, καθώς όπως έχουμε αναφέρει και πιο πάνω ο αντικειμενικός φακός αποτελείται από ένα σύστημα φακών που όλοι οι φακοί που το απαρτίζουν έχουν την προαναφερθείσα επίστρωση. Βέβαια μπορούν να κατασκευαστούν αντικειμενικοί φακοί με επίστρωση στο επιθυμητό μήκος κύματος

Σε περίπτωση όμως που αποφασίσουμε το laser μας να είναι στο ορατό φάσμα και όχι στο υπέρυθρο με σκοπό να αποφύγουμε την απώλεια ισχύος της δέσμης, τότε θα προκύψει άλλο πρόβλημα, αυτή τη φορά όμως αφορά τον διχρωμικό κάτοπτρο που έχει αναφερθεί πιο πάνω. Παρόλο που η δέσμη laser θα ανακλάται πλήρως από τον διχρωμικό καθρέπτη, θα δημιουργείται πρόβλημα κατά την παρατήρηση της εικόνας αφού μέρος της θα αποκόπτεται.

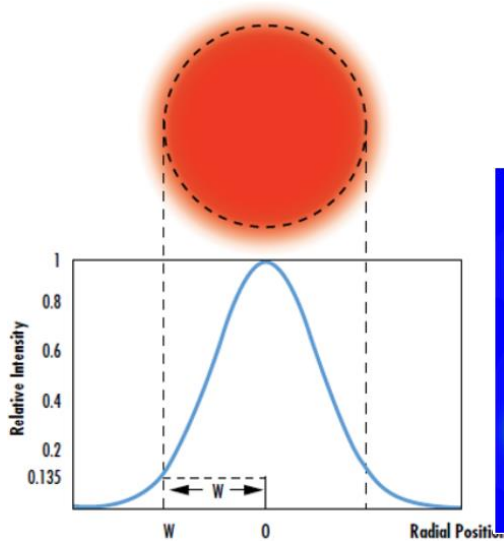
Για το τέλος έχω αφήσει το σημαντικότερο ίσως κομμάτι της πειραματικής διάταξης, που δεν είναι άλλο από το laser. Από την ανακάλυψη του laser το 1960 έχουν μεσολαβήσει πολλά χρόνια και ακόμα περισσότερες κατηγορίες, όπως για παράδειγμα το είδος λειτουργίας του (παλμικό/συνεχές), το υλικό του laser (στερεάς κατάστασης, ημιαγωγών, υγρής & αέριας κατάστασης) κ.ο.κ. Επίσης αναλόγως με το κάθε laser υπάρχει και το αντίστοιχο μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπει.

ΧΑΡΑΚΗΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΛΕΙΖΕΡ ΤΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΠΑΓΙΔΑΣ

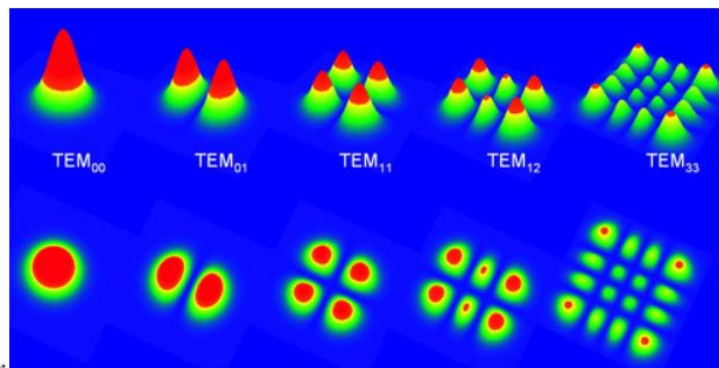
Κρίσιμη παράμετρος είναι και τα χαρακτηριστικά που πρέπει να πληροί το laser έτσι ώστε να μπορεί να δημιουργήσει μια αρκετά έντονη βαθμίδα που να είναι ικανή να παγιδεύσει το σωματίδιο, χωρίς όμως να βλάπτει το παγιδευμένο σωματίδιο που πολλές φορές είναι κάποιο βιολογικό δείγμα.

Σε μια συμβατική διάταξη οπτικής παγίδας το laser θα πρέπει να είναι συνεχούς λειτουργίας, έτσι ώστε να είναι ικανό να δημιουργεί μια σταθερή παγίδα. Αυτό βέβαια μπορεί να διαφοροποιηθεί αναλόγως με το πείραμα και το τι απαιτήσεις υπάρχουν από την πειραματική διάταξη. Μελέτες έχουν δείξει ότι ένα υψηλού ρυθμού επανάληψης laser (femtosecond-pulsed) μπορεί να είναι εξίσου αποδοτικό με ένα laser συνεχούς λειτουργίας όσον αφορά την οπτική παγίδευση. [68].

Σχετικά με τον τύπο της δέσμης, αυτός που ευρέως χρησιμοποιείται είναι η TEM₀₀ Gaussian beam. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι ακραίες ακτίνες της δέσμης συνεισφέρουν στην αξονική δύναμη βαθμίδας, ενώ οι κεντρικές ακτίνες είναι υπεύθυνες για τη συνιστώσα σκέδασης, μεγαλύτερη απόδοση της οπτικής παγίδευσης κατά τον άξονα της δέσμης μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση δέσμης ρυθμού TEM₀₁ ('donut' mode)[9].



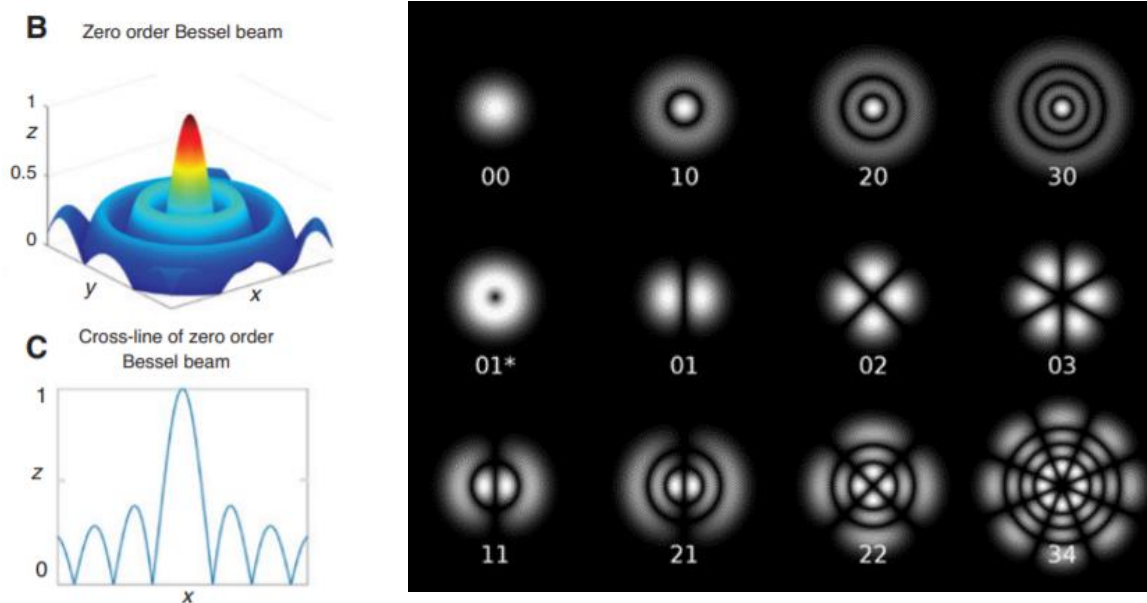
Εικόνα 17: Το προφίλ μιας Gaussian δέσμης TEM₀₀.



ΕΙΚΟΝΑ 16: ΤΟ ΠΡΟΦΙΛ GAUSSIAN ΔΕΣΜΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΡΥΘΜΩΝ.

Βεβαίως υπάρχουν πολλές κατηγορίες δέσμης που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν όπως για παράδειγμα Hermite-Gaussian beam [TEM_{xy}] Laguerre-Gaussian [LG] beams [TEM_{pl}] και Bessel beams.

Οι διατάξεις που βασίζονται σε Laguerre-Gaussian δέσμες έχουν την μοναδική δυνατότητα να παγιδεύουν σωματίδια που είναι ανακλαστικά και απορροφητικά. Ακόμα, οι συγκεκριμένες δέσμες διαθέτουν καλά καθορισμένη τροχιακή στροφορμή που μπορεί να περιστρέψει τα σωματίδια χωρίς τη χρήση εξωτερικού μηχανισμού.[60]



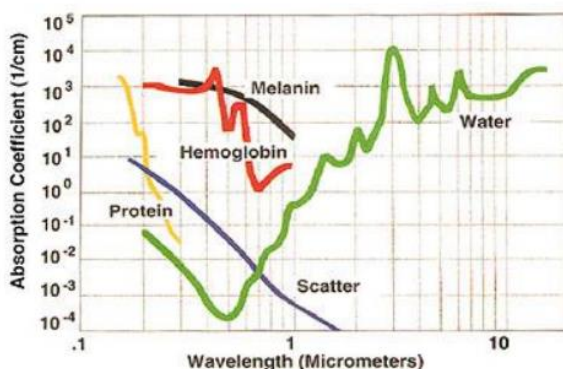
Εικόνα 18 Α) Προφίλ δέσμης Bessel μηδενικής τάξης Β) Προφίλ δεσμών Bessel μεγαλύτερης τάξης.

Οι δέσμες Bessel μηδενικής ή και ανώτερης τάξης, έχουν μια μοναδική ικανότητα να παγιδεύουν και να περιστρέφουν πολλαπλά σωματίδια που απέχουν μεταξύ τους χιλιοστά ακόμα και αν στο ενδιάμεσο υπάρχουν εμπόδια. [69]

Ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας είναι το μήκος κύματος της δέσμης laser, ο οποίος πρέπει να επιλεγεί ανάλογα με το υπό μελέτη δείγμα (αν είναι βιολογικό ή όχι και τι είδους). Τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται για την οπτική παγίδευση βιολογικών δειγμάτων είναι στο ορατό φάσμα μέχρι το υπέρυθρο, και πιο συγκεκριμένα 600 nm μέχρι 1,1 μm καθώς το υπεριώδες μπορεί να προκαλέσει αλλοιώσεις στο δείγμα, εκτός βέβαια αν το επιθυμητό αποτέλεσμα ήταν η πρόκληση φωτοχημικών φαινομένων ή σπάσιμο δεσμών κοκ.

Επειδή κυρίως τα παγιδευμένα σωματίδια είναι βιολογικά δείγματα θα πρέπει να λάβουμε υπόψη κάποιους παράγοντες ώστε να μην έχουμε καταστροφή του παγιδευμένου σωματιδίου.

Ο πρώτος παράγοντας είναι το μήκος κύματος που θα επιλεγεί. Καταρχάς δεν θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε laser με μήκος κύματος στο υπεριώδες καθώς θα προκαλέσει αλλοιώσεις στο δείγμα, εκτός βέβαια αν το επιθυμητό αποτέλεσμα ήταν η πρόκληση φωτοχημικών φαινομένων ή σπάσιμο δεσμών κοκ. Στη συνέχεια πρέπει να δούμε από τι υλικό είναι το δείγμα έτσι ώστε να γίνει



Εικόνα 19: Διάγραμμα απορρόφησης των βιομορίων ανάλογα με το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου laser.

κατάλληλη επιλογή του μήκους κύματος εκεί που υπάρχει λιγότερη απορρόφηση ενέργειας. Όπως βλέπουμε από το διπλανό διάγραμμα απορρόφησης των βιομορίων, οι πρωτεΐνες και το DNA έχουν μέγιστη απορρόφηση στο υπεριώδες ενώ η μελανίνη και η αιμοσφαιρίνη στο ορατό φάσμα της ακτινοβολίας. Αυτό το παράθυρο απορρόφησης εξασθενεί όσο προχωράμε στο υπέρυθρο, όμως ξεκινάει το παράθυρο απορρόφησης του νερού που είναι και το βασικό υλικό όλων των βιοδομών το οποίο όσο προχωράμε στο φάσμα όλο και αυξάνεται.

Ακολουθως, για να μην έχουμε καταστροφή των

βιολογικών κυττάρων που παγιδεύουμε πρέπει να καθορίσουμε σωστά και την ισχύς της δέσμης, αλλά και το χρόνο αλληλεπίδρασης με το δείγμα. Ο χρόνος αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με το δείγμα δεν πρέπει να έχει μεγάλη διάρκεια, καθώς αρχικά υπάρχει πιθανότητα πρόκλησης βλάβης στο δείγμα λόγω υπερθέρμανσης, αλλά και με την πάροδο του χρόνου προκαλείται αύξηση θερμοκρασία στο δείγμα και στον περιβάλλοντα χώρο με αποτέλεσμα την αποδυνάμωση της ισχύος της παγίδας εξαιτίας των θερμικών διακυμάνσεων. [70]

2.2 Διάφορα είδη οπτικών λαβίδων

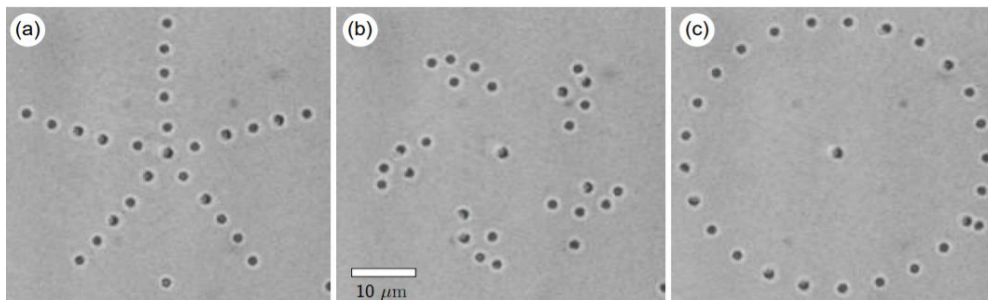
Παρακάτω παρουσιάζονται επιγραμματικά διάφορα είδη διατάξεων οπτικής παγίδας πέρα από αυτή της «συμβατικής οπτικής παγίδας» που περιεγράφηκε παραπάνω. Κάθε πειραματική διάταξη που θα αναφερθεί έχει και τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα της. Έχοντας μια πιο αναβαθμισμένη πειραματική διάταξη με περισσότερες δυνατότητες χειρισμού συνήθως αυξάνεται και το κόστος. Ανάλογα με το εργαστήριο και το πείραμα που πρόκειται να γίνει, γίνεται και η σωστή επιλογή της κατάλληλης πειραματικής διάταξης.

2.2.1 Συμβατική οπτική λαβίδα: (COT: Conventional Optical Tweezers)

Η συμβατική οπτική παγίδα που έχει περιγραφεί πιο πάνω, που ενώ είναι εύκολη στην κατασκευή, έχει δυστυχώς το μειονέκτημα ότι για την οδήγηση και διεύρυνση της δέσμης χρειάζονται οπτικά μέρη (φακοί). Αυτό δημιουργεί μια ογκώδη πειραματική διάταξη η οποία δεν είναι καθόλου ευέλικτη.

2.2.2 Ολογραφική οπτική παγίδα (Holographic Optical Tweezers, HOT):

Η πειραματική διάταξη της ολογραφικής οπτικής παγίδας μοιάζει πολύ με αυτή της COT με την διαφορά ότι σε αυτή τη διάταξη γίνεται χρήση ενός περιθλαστικού οπτικού στοιχείου, το οποίο χωρίζει την δέσμη σε πολλές άλλες ξεχωριστές δέσμες που στη συνέχεια εστιάζονται μέσω ενός συγκλίνων φακού δημιουργώντας έτσι πολλαπλές παγίδες. Το περιθλαστικό οπτικό στοιχείο που αναφέρθηκε πιο πάνω είναι ένας χωρικός ρυθμιστής φωτός υγρών κρυστάλλων που ρυθμίζεται μέσω ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή, μέσω του οποίου ρυθμίζονται και τα μοτίβα των πολλαπλών παγίδων. Αυτό το είδος οπτικής λαβίδας έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να παγιδεύσει- χειριστεί πολλά σωματίδια μαζί. Όμως, στην πιο πάνω διάταξη παραμένει το πρόβλημα της μη-ευέλικτης πειραματικής διάταξης καθώς και το ότι υπάρχει δυσκολία στην σταθερή παγίδευση νανοσωματιδίων λόγω του ορίου περίθλασης. [71]



Εικόνα 20: Οι διάφοροι σχηματισμοί που μπορούν να δημιουργήσουν 26 σφαιρίδια silica με διάμετρο 0.99μm. Ξεκινάει με τον (α) σχηματισμό και με διαδοχικά βήματα γίνεται το (β) και μετά το (c)

2.2.3 Πλασμονική οπτική παγίδα (Surface Plasmon-based optical tweezers, SPOT):

Η πλασμονική οπτική παγίδα με την χρήση διηλεκτρικών νανοδομών σε συνδιασμό με τη χρήση του laser μειώνει τις απώλειες λόγω θερμότητας και ενισχύει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ενισχύεται με την σειρά της και η οπτική δύναμη.[72] Η μέθοδος SPOT έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να παγιδεύει με μεγάλη σταθερότητα νανοσωματίδια, ακόμα και μόρια μερικών nm. Για να επιτευχθεί όμως η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη απαιτεί το σχεδιασμό νανοδομών, οι οποίες όμως περιορίζουν την ευελιξία στον χειρισμό της πειραματικής διάταξης.[73]

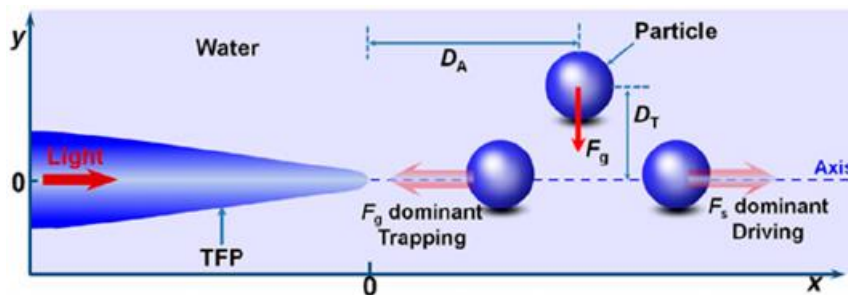
Στη συνέχεια, θα δούμε διαφορετικού είδους πειραματικές διατάξεις οι περισσότερες εκ των οποίων έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό ότι η οδήγηση της δέσμης γίνεται μέσω μιας οπτικής ίνας. Συνεπώς, αφού έχει απλοποιηθεί η δομή της πειραματικής διάταξης έχουμε τα εξής πλεονεκτήματα.

- I. Η οπτική ίνα μπορεί να μπει μέσα σε θολά/πυκνά δείγματα και έτσι έχουμε περισσότερες δυνατότητες εφαρμογής.
- II. Μειώνεται το κόστος της πειραματικής διάταξης.
- III. Μπορεί να ενσωματωθεί σε μικρές συσκευές όπως τσιπς (chips), οπτικο-ρευστά κανάλια (optofluidic channels) και καθετήρες κάτι που μας δίνει την πολυχρηστικότητα που

αναζητούσαμε σε πιο απαιτητικές εφαρμογές σε ιατρικές αλλά και βιολογικές εφαρμογές. [74]

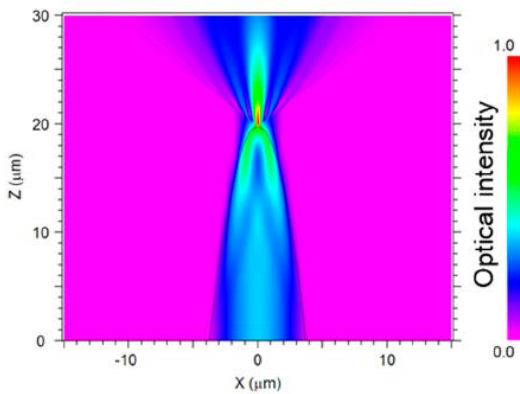
2.2.4 Παγίδα μονής οπτικής ίνας (Single Optical Fiber Tweezers, SOFT)

Όπως φανερώνει και το όνομα της συγκεκριμένης πειραματικής διάταξης, η οδήγηση της δέσμης γίνεται μέσω μιας οπτικής ίνας. Η περιγραφή των δυνάμεων είναι αντιστοιχη με αυτή της συμβατικής οπτικής λαβίδας, δηλαδή έχουμε την δύναμη βαθμίδας και τη δύναμη σκέδασης. Σε αυτή την περίπτωση η δύναμη βαθμίδας ελκύει τα σωματίδια και η δύναμη σκέδασης τα σπρώχνει. Αυτό που θα καθορίσει ποια δύναμη θα υπερισχύσει είναι η απόσταση του σωματιδίου από την άκρη της οπτικής ίνας. Αν είναι κοντά στην οπτική ίνα θα κινηθεί προς την άκρη της ίνας, αλλιώς η F_s θα σπρώξει το σωματίδιο μακριά.



Εικόνα 21: Οπτική παγίδευση σωματιδίου με τη χρήση οπτικής ίνας για την οδήγηση της δέσμης λέιζερ.

Η κύρια διαφορά της με την συμβατική οπτική παγίδα είναι ότι δεν χρειάζεται ο αντικειμενικός φακός για να γίνει η εστίαση του φωτός ούτε και οπτικά στοιχεία για τον χειρισμό και οδήγηση της δέσμης. Το φως εστιάζεται κοντά στο άκρο της οπτικής ίνας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σε πολλές περιπτώσεις το σωματίδιο να έρχεται σε επαφή με την οπτική ίνα, αφού το πιο πιθανόν είναι να ακουμπά στην άκρη της.[73]



Εικόνα 22: Γραφική αναπαράσταση της οπτικής πυκνότητας. Είναι ξεκάθαρο ότι η οπτική πυκνότητα είναι μέγιστη στο άκρο της οπτικής ίνας.

Μειονέκτημα μιας τέτοιας πειραματικής διάταξης είναι ο περιορισμός που επιβάλλει το όριο περίθλασης.

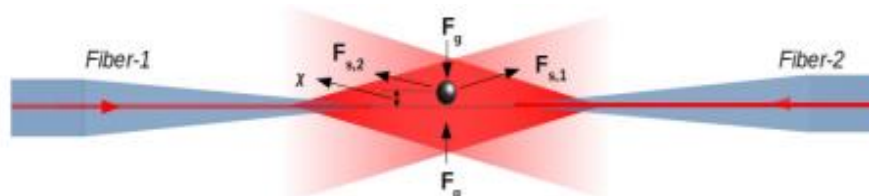
Λόγω της απλής δομής της και της εύκολης κατασκευής της η SOFT χρησιμοποιείται ευρέως για παγίδευση και χειρισμό σωματιδίων. Έχει δώσει νέο αέρα και δυνατότητες στο χειρισμό των σωματιδίων αφού μετακινώντας την οπτική ίνα μετακινείται αντίστοιχα και το παγιδευμένο σωματίδιο. Με τέτοια ευελιξία μπορεί η SOFT να εφαρμοστεί σε διάφορες περιστάσεις όπως για παράδειγμα στην διάταξη σωματιδίων με ακρίβεια σε διάφορα μοτίβα (patterns), παγίδευση μέσα σε υδατικό περιβάλλον, όπως και σε διάφορα βάθη/ γωνίες. Το

Αντικείμενα	Οπτική Λαβίδα με την χρήση μονής οπτικής ίνας	Συμβατική Οπτική Λαβίδα (COTs)
Βασικά εξαρτήματα	Πηγή λέιζερ, κωνική οπτική ίνα	Πηγή λέιζερ, αντικειμενικός φακός με μεγάλο αριθμητικό άνοιγμα και οπτικά εξαρτήματα για διεύρυνση και οδήγηση της δέσμης
Κατασκευή	Εύκολη, απλή σύνδεση της οπτικής ίνας με την διάταξη	Προσεχτικός σχεδιασμός της διαδρομής της δέσμης μέσω των οπτικών εξαρτημάτων
Δυνατότητα ενσωμάτωσης	Πολύ συμπαγής, μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα σε άλλες διατάξεις	Όχι συμπαγής
Ευελιξία χειρισμού	Πολύ ευέλικτη, τα παγιδευμένα σωματίδια μπορούν να αλλάξουν διάφορες θέσεις μετακινώντας απλά την οπτική ίνα	Λιγότερο ευέλικτη, ο χειρισμός των παγιδευμένων σωματιδίων μπορεί να γίνει μόνο με αλλαγή στην εστίαση της δέσμης.
Suspension applicability	Ευρεία, η οπτική ίνα μπορεί να τοποθετηθεί σε suspensions σε διαφορετικές κατευθύνσεις και βάρη για παγίδευση και χειρισμό	Είναι περιορισμένο το βάθος και η κατεύθυνση παγίδευσης καθώς η εστίαση δημιουργείται από τον αντικειμενικό φακό με το υψηλό αριθμητικό άνοιγμα

Πίνακας 1 Σύγκριση συμβατικής οπτικής λαβίδας και οπτικής λαβίδας με οπτική ίνα

2.2.5 Παγίδα διπλής οπτικής ίνας (Dual Fiber Tweezers, DFT):

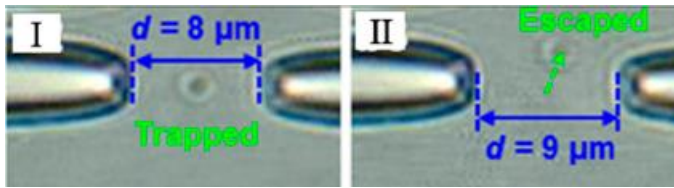
Η DFT χρησιμοποιεί κυρίως την δύναμη σκέδασης για την παγίδευση σωματιδίων από δέσμες που προέρχονται από 2 οπτικές ίνες. Οι δύο δέσμες οι οποίες διαδίδονται αντιπαράλληλα, ισορροπούν την πίεση ακτινοβολίας τους σε μια θέση ισορροπίας, επιτρέποντας έτσι την σταθερή παγίδευση με σχετικά χαμηλή ένταση ακτινοβολίας[75]. Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης πειραματικής διάταξης είναι αρκετά. Αρχικά λόγω του ότι η δέσμη laser δεν είναι εστιασμένη παρατηρείται λιγότερη ζημιά λόγω της ακτινοβολίας στα ζωντανά κύτταρα. Επιτρέπει τον πιο ακριβή έλεγχο των νανοσωματιδίων καθώς και τον χειρισμό σχετικά μεγάλων σωματιδίων ή κυττάρων της τάξης των μικρομέτρων.



ΕΙΚΟΝΑ 23: ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΠΑΓΙΔΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ.

Μερικές εφαρμογές που μπορούν να επιτευχθούν με την χρήση της DFT είναι οι πιο κάτω:

Με την συγκεκριμένη πειραματική διάταξη μπορεί να γίνει περιστροφή του σωματιδίου. Οι δέσμες τοποθετούνται αντιπαράλληλα και αφού παγιδεύσουν το σωματίδιο σιγά σιγά μετακινούνται για



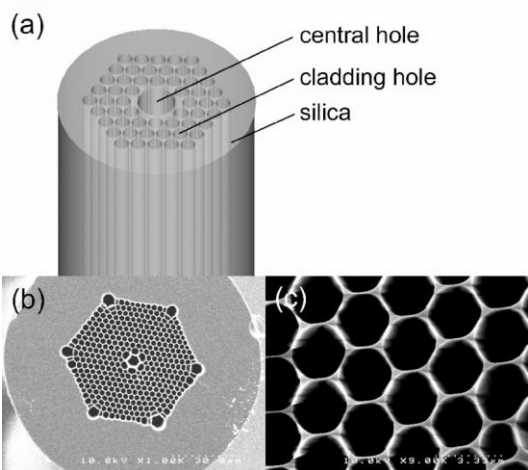
να περιστρέψουν το σωματίδιο. Επίσης, ένα σωματίδιο που βρίσκεται ανάμεσα σε 2 δέσμες της DFT μπορεί να παραμορφωθεί μέσω των επιφανειακών δυνάμεων που ασκούνται στο σωματίδιο κατά τον άξονα της δέσμης. [73]

Εικόνα 24: I) Παγιδευμένο σωματίδιο απο τις δέσμες δύο λέιζερ II) όταν μεγαλώσει η απόσταση που έχουν τα άκρα των οπτικών ινών η παγίδευση δεν είναι πλέον εφικτή και το σωματίδιο ξεφεύγει



Εικόνα 25: Βήμα προς βήμα η περιστροφή ενός σωματιδίου με τη χρήση οπτικής παγίδας με 2 ίνες.

Παρόλο που η χρήση των πιο πάνω πειραματικών διατάξεων οπτικής παγίδευσης με την χρήση οπτικών ινών έχουν εφαρμοστεί με μεγάλη επιτυχία σε διάφορους τομείς της επιστήμης, η ανάγκη



για βελτίωση δεν σταματάει ποτέ. Έτσι, δημιουργήθηκαν οι structured optical fiber με σκοπό την καλύτερη παγίδευση των νανοσωματιδίων για να ξεπεραστεί και το πρόβλημα που είχε αναφερθεί πιο πάνω με το όριο περίθλασης. Οι structured optical fibers βασίζουν την λειτουργία τους σε μια εντελώς διαφορετική προσέγγιση από τις συμβατικές οπτικές ίνες. Οι συνηθισμένες οπτικές ίνες βασίζουν την κυματοδότηση στο δείκτη διάθλασης και φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης, ενώ οι structured optical fibers στην αλλαγή της δομής του. Το πιο συνηθισμένο υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένες είναι το πυρίτιο ενώ στην περιοχή του πυρήνα υπάρχουν σπές αέρα. [76]

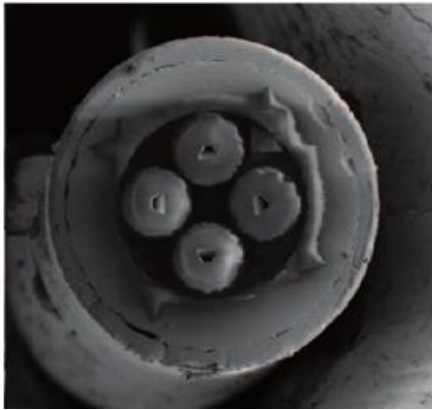
Εικόνα 26: Structured optical fiber, όπου φαίνονται οι σπές αέρα που υπάρχουν στο εσωτερικό ενώ γύρω είναι η επένδυση από πυρίτιο.

2.2.6 Οπτικές ίνες ολικής εσωτερικής ανάκλασης (Fiber-based Total Internal Refection Lens):

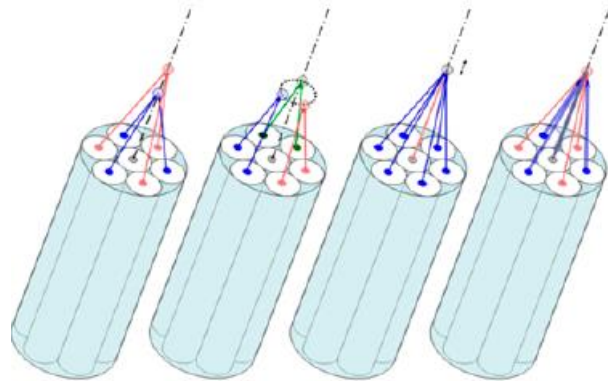
Στην περίπτωση αυτή, ένα σύνολο από οπτικές ίνες περικλείεται από ένα περίβλημα χαλαζία, όπου το άκρο έχει επεξεργαστεί κατάλληλα, ώστε η διάδοση της δέσμης από την οπτική ίνα προς το

περιβάλλον μέσο να γίνεται με πλήρη ανάκλαση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργείται μέγιστη εστίαση μακριά από το άκρο της οπτικής ίνας. Με αυτό τον τρόπο έχει εξασφαλιστεί ότι θα επιτευχθεί ανέπαφη παγίδευση σε κάποια απόσταση από τα άκρα των οπτικών ινών.

Η διάδοση φωτός κατά τον z-άξονα έχει μια κλίση έτσι ώστε να αποδυναμωθεί η F_s που ασκείται στα σωματίδια. Αλλάζοντας την γωνία που εξέρχεται το φως, μπορούμε να μετακινήσουμε ελαφρά και το σημείο που εστιάζονται τα σωματίδια, και έτσι αναλόγως μπορούμε να δημιουργήσουμε διαφορετικά πηγάδια δυναμικού σε διαφορετικές αποστάσεις από την άκρη της ίνας και συνεπώς και διαφορετικές λειτουργίες.



Εικόνα 15 Τομή που φαίνεται το εσωτερικό μιας τέτοιας διάταξης. δηλαδή φαίνεται το περίβλημα χαλαζία που περιβάλλει τις οπτικές ίνες



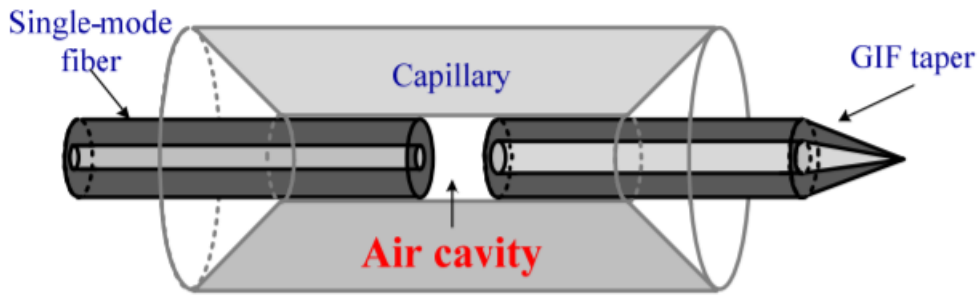
Εικόνα 16: Παρουσιάζεται σχηματικά το θεωρητικό σημείο εστίασης που έχουν οι δέσμες λέιζερ που διαδίδονται μέσα στις οπτικές ίνες με το κυρτό άκρο

2.2.7 Οπτική ίνα βαθμιαίου δείκτη διάθλασης (Graded-Index Optical fiber):

Ακόμα μια πειραματική διάταξη που επιτυγχάνει ανέπαφη παγίδευση και χειρισμό σωματιδίων.

Η οπτική ίνα που χρησιμοποιείται στην διάταξη αυτή δεν μοιάζει με τις ίνες που χρησιμοποιήθηκαν πιο πάνω. Ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα δεν είναι ομοιόμορφος, είναι δηλαδή μεγαλύτερος στον άξονα του πυρήνα και όσο απομακρύνεται ακτινικά από τον άξονα μειώνεται. Βέβαια ο δείκτης διάθλασης του περιβλήματος είναι σταθερός σε όλο του το μήκος.

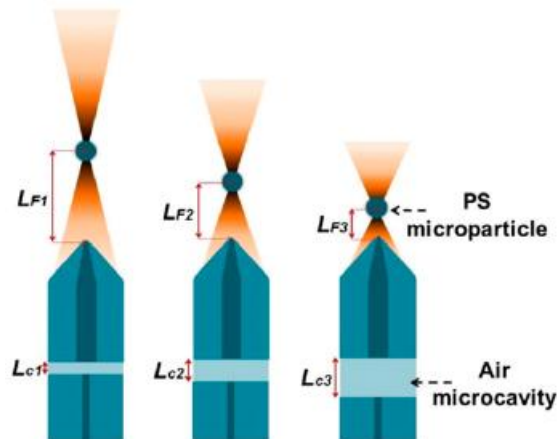
Αυτή η διάταξη συνδέεται με την κλασική μονορυθμική οπτική ίνα και ευθυγραμμίζονται μέσα σε ένα πολύ λεπτό σωλήνα δημιουργώντας μια κοιλότητα με αέρα το μήκος της οποίας μπορεί να ρυθμιστεί.



Εικόνα 17: Σχηματική αναπαράσταση των βασικών στοιχείων της διάταξης. Φαίνεται η κοιλότητα του αέρα που μπορεί να μεταβληθεί το μήκος της, καθώς και η την μονορυθμική οπτική ίνα που προηγείται της οπτικής ίνας με τον μεταβλητό δείκτη διάθλασης.

Το συγκεκριμένο είδος οπτικής λαβίδας είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για πολλούς λόγους.

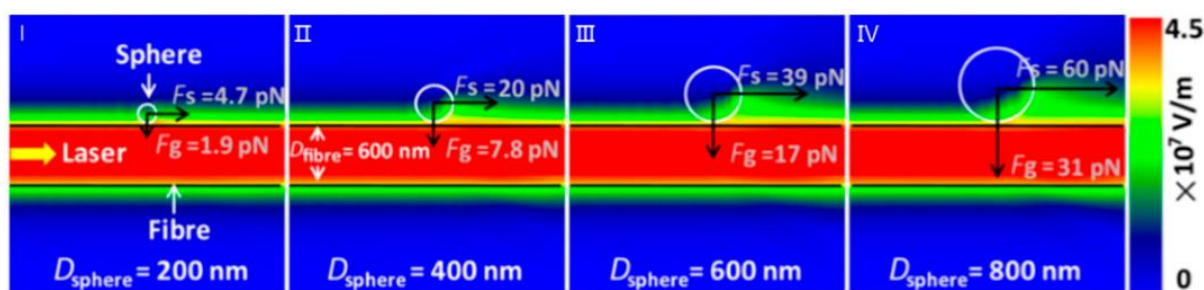
- Η παγίδευση και ο χειρισμός γίνονται εντελώς ανέπαφα.
- Δημιουργεί ισχυρή παγίδευση και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσα σε υγρά που έχουν ροή.
- Είναι μια ρυθμιζόμενη πειραματική διάταξη, αφού μεταβάλλοντας το μήκος της κοιλότητα του αέρα αλλάζει και η εστίαση της δέσμης. Έτσι εξισορροπείται η οπτική δύναμη με την δύναμη ροής. Επίσης, μπορεί να ρυθμιστεί και η ισχύς της δέσμης, ο ρυθμός ροής κτλ.
- Έχουμε μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας (working range) και συνεπώς περισσότερες εφαρμογές.



Εικόνα 18: Παρουσιάζεται η μεταβολή στο σημείο εστίασης καθώς μεταβάλλεται η κοιλότητα του αέρα στο εσωτερικό του περιβλήματος

2.2.8 Subwavelength Optical Fiber For Evanescent Fields-Based Trapping:

Η συγκεκριμένη οπτική ίνα έχει το χαρακτηριστικό ότι η διάμετρος της είναι μικρότερη από το μήκος κύματος του φωτός που μεταδίδεται μέσα της. Σε συνδυασμό με το “evanescent field” (πεδίο που φθίνει εκθετικά όσο μεγαλώνει η απόσταση από την επιφάνεια και είναι κάθετο στην οπτική ίνα) μπορεί να παγιδεύσει και να μεταφέρει σωματίδια σε μεγαλύτερο εύρος. Οι οπτικές δυνάμεις δημιουργούνται από το evanescent field γύρω από την ίνα και είναι αυτές που παγιδεύουν τα σωματίδια. Στην επιφάνεια της ίνας η ένταση από το πεδίο βαθμίδας είναι μέγιστη, και συνεπώς εκεί είναι μέγιστη και η δύναμη βαθμίδας F_g (η οποία είναι και αυτή κάθετη στην οπτική ίνα) που παγιδεύει τα σωματίδια. Η δύναμη σκέδασης F_s είναι αυτή που κινεί τα παγιδευμένα σωματίδια κατά μήκος της διάδοσης του φωτός.



Εικόνα 18: Προσομοίωση για διαφορετικά μεγέθη του παγιδευμένου σωματιδίου[77]

Ευκολά μπορεί να αντιληφθεί κανείς ότι με αυτά τα χαρακτηριστικά η συγκεκριμένη οπτική λαβίδα είναι ένα πολύ εξειδικευμένο εργαλείο που μπορεί να παγιδεύσει αλλά και να μεταφέρει σωματίδια σε μεγαλύτερη απόσταση-βάθος. Δεν έχουμε σαν περιορισμό ούτε το όριο περίθλασης όπως σε άλλες οπτικές λαβίδες ούτε το βάθος εστίασης. Έτσι ξεδιπλώνονται ακόμα περισσότερες δυνατότητες εφαρμογής.

ΚΕΦΆΛΑΙΟ 3 – Μελέτη της οπτικής παγίδας σε σωματίδια

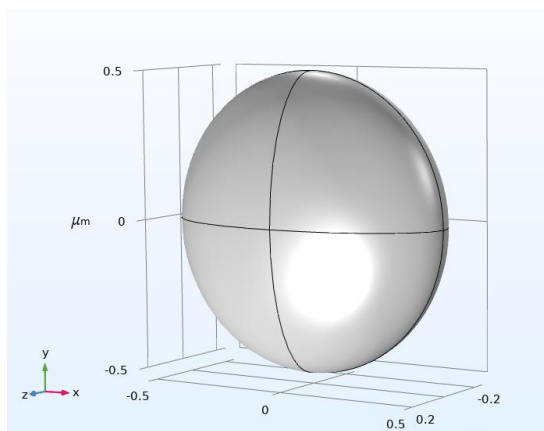
Στα προηγούμενα κεφάλαια είχαμε δει με αρκετή λεπτομέρεια το θεωρητικό υπόβαθρο της οπτικής παγίδευσης σωματιδίων καθώς και την πειραματική διάταξη που απαιτείται για να επιτευχθεί. Παρόλο που η οπτική παγίδευση ακούγεται μια αρκετά απλή τεχνική ωστόσο είναι πολλοί οι παράγοντες που πρέπει να μελετηθούν έτσι ώστε να έχουμε μια ισχυρή και σταθερή παγίδα. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο σε αυτό το σημείο, με τη χρήση ενός προγράμματος προσομοίωσης, θα προσομοιώσουμε την οπτική παγίδα, και θα εντοπίσουμε τις τιμές των παραμέτρων της παγίδας αλλά και χαρακτηριστικών των παγιδευμένων σωματιδίων για τις οποίες η παγίδα είναι πιο ισχυρή. Το πρόγραμμα που θα χρησιμοποιηθεί είναι το Comsol Multiphysics.

Το Comsol είναι ένα ισχυρό πρόγραμμα προσομοίωσης, με αρκετές υπολογιστικές δυνατότητες. Μπορεί να προσομοιώσει μεγάλη γκάμα από φυσικά πρόβλημα και να δώσει τις κατάλληλες λύσεις, ανάλογα με τα δεδομένα που του έχουμε καταχωρήσει. Έτσι στο σημείο αυτό θα περιγράψουμε την διαδικασία που ακολουθήθηκε έτσι ώστε να προσομοιωθεί η πειραματική διάταξη της οπτικής παγίδας.

3.1 Περιγραφή COMSOL

Σαν πρώτο βήμα απαραίτητη προϋπόθεση είναι η σωστή επιλογή του θεωρητικού μοντέλου που επιθυμούμε να προσομοιώσουμε. Στην δική μας περίπτωση επειδή πρόκειται για προσομοίωση μιας δέσμης laser, είναι προφανές ότι η δέσμη laser ισοδυναμεί με ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Αυτό δηλαδή είναι το φυσικό μοντέλο που θα εισάγουμε στο COMSOL (electromagnetic waves-ewfd).

Στη συνέχεια πολύ σημαντικό ρόλο έχει η δημιουργία της γεωμετρίας που θέλουμε να μελετήσουμε, δηλαδή το σχήμα της, οι διαστάσεις της, το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένη κοκ. Το σχήμα του σωματιδίου που επιθυμώ να παγιδευτεί είναι ένα ελλειψοειδές με διαστάσεις



Εικόνα 27: Γεωμετρία παγιδευμένου σωματιδίου

$$R_x = 0.5 \mu\text{m}$$

$$R_y = 0.5 \mu\text{m}$$

$$R_z = 0.25 \mu\text{m}$$

Αρχικός σκοπός μας ήταν ο υπολογισμός των οπτικών δυνάμεων που ασκούνται σε ένα παγιδευμένο ελλειψοειδές. Το Comsol παρέχει μια αρκετά μεγάλη λίστα από υλικά που παρόλα αυτά δεν περιελάμβανε το υλικό απ' το οποίο επιθυμούσαμε, έτσι ορίσαμε εμείς τα χαρακτηριστικά του υλικού, έτσι όπως έχουν οριστεί και στην διεθνή βιβλιογραφία. [78]

Οι πιο κάτω παράμετροι έχουν οριστεί με τέτοιο τρόπο ώστε το υλικό που χαρακτηρίζουν να είναι κοντά στα βιολογικά δείγματα.

Δείκτης διάθλασης: $n_1= 1,378$

relative permittivity : $\epsilon_r=1,378^2$

Electric conductivity: $\sigma=0$ (S/m)

Relative permeability: $\mu_r=1$

Αντίστοιχα ορίσαμε και το υλικό του buffer, που μέσα σε αυτό βρίσκεται το σωματίδιο. Το buffer που έχουμε ορίσει είναι νερό στην δική μας περίπτωση.

Δείκτης διάθλασης: $n_2= 1,335$

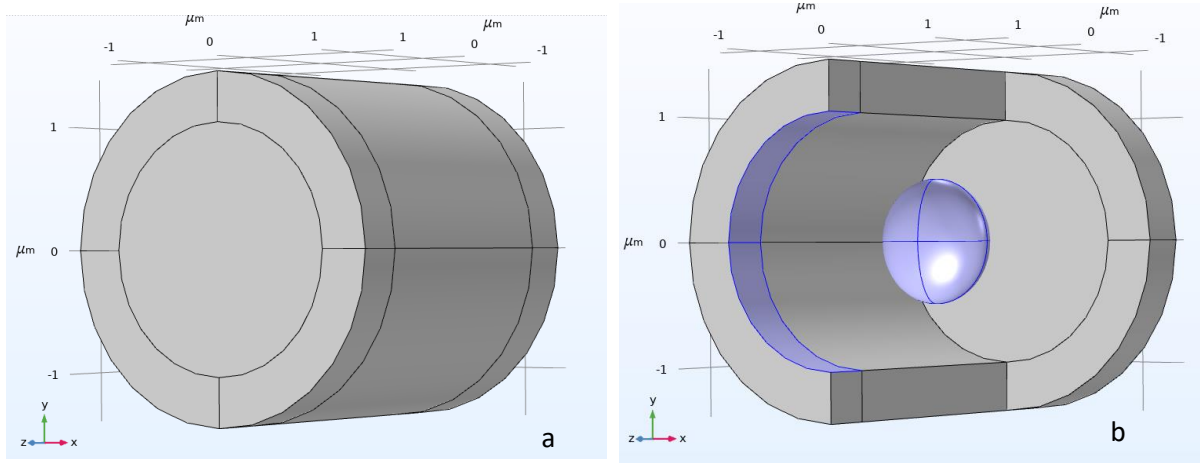
Relative permittivity: $\epsilon_r=1,335^2$

Electric conductivity: $\sigma=0$ (S/m)

Relative permeability: $\mu_r=1$

Αφού λοιπόν είχαμε ορίσει την γεωμετρία αλλά και τα απαραίτητα υλικά, προχωρήσαμε στην δημιουργία του Perfectly Matched layer (PML). Το PML είναι μια επιφάνεια που τοποθετείτε εξωτερικά του ελλειψοειδούς. Έτσι ώστε να απορροφά τα εξερχόμενα κύματα. Το PML το έχουμε ορίσει με κυλινδρική συμμετρία και περικλείει το ελλειψοειδές και το έχουμε ορίσει το ίδιο υλικό με το περιβάλλον του σωματιδίου. Ο λόγος που το έχουμε ορίσει σαν κύλινδρο είναι διότι προσομοιάζει καλύτερη τη γεωμετρία του σωματιδίου και της δέσμης.

Το PML αποτελεί μια σημαντική προσθήκη στην γεωμετρία μας. Είναι ουσιαστικά μια τεχνητή στρώση απορρόφησης που χρησιμεύει στο να απορροφά το σκεδαζόμενο φως, έτσι ώστε αυτό να μην επανεισέρχεται στην περιοχή προσομοίωσης και να δημιουργεί αλλοιώσεις. Εάν είχαμε πολύ μεγάλη περιοχή προσομοίωσης δεν θα χρειαζόνταν, τώρα όμως που είναι περιορισμένη είναι απαραίτητο

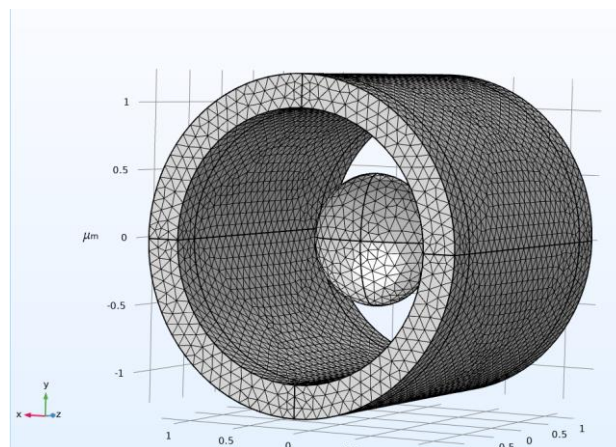


Εικόνα 28: Στην εικόνα a) βλέπουμε την κυλινδρική γεωμετρία που έχει το PML ενώ στην b) φαίνεται πως περιβάλλει το ελλειψοειδές.

Πριν προχωρήσουμε στον ορισμό των κατάλληλων εξισώσεων, έχουμε διακριτοποιήσει (mesh) την γεωμετρία μας. Η διακριτοποίηση ουσιαστικά χωρίζει την γεωμετρία σε πολλά μικρά κομματάκια και αυτό καθορίζει την ακρίβεια με την οποία θα υπολογιστεί η λύση μας. Αυτό βέβαια έχει κάποιο κατώφλι, που ουσιαστικά καθορίζεται από την υπολογιστική δύναμη του υπολογιστή που χρησιμοποιούμε.

Όσο πιο πυκνό είναι το mesh, δηλαδή όσο μικρότερα είναι τα στοιχειώδεις κομμάτια στα οποία έχει χωριστεί η γεωμετρία μας, τόσο μεγαλύτερη υπολογιστική δύναμη είναι απαραίτητη αφού το αποτέλεσμα θα είναι υπολογισμένο με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Με βάση τις ικανότητες του δικού μου υπολογιστή το μέγιστο μέγεθος στοιχείου έχει οριστεί $\frac{\lambda}{n_{RBC}/5}$ ενώ το μικρότερο $\frac{\lambda}{n_{RBC}/11}$.



Εικόνα 29: Το meshing της γεωμετρίας

Πολύ σημαντικό ρόλο στην εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων, έχει η δήλωση των εξισώσεων που περιγράφουν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα της δέσμης laser.

Έχουμε ορίσει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα ως μια γκαουσιανή δέσμη

$$E_b = E_{b0} \cdot \frac{w_0}{w(z)} \cdot e^{-\frac{((x-x_0)^2+(y-y_0)^2)}{w(z)^2}} \cdot e^{-j*k*(z-z_0) - j*k*\frac{((x-x_0)^2+(y-y_0)^2)}{2*R(z)^2} + j*ph(z)} \quad [V/m]$$

Στην πιο πάνω εξίσωση υπάρχουν αρκετές μεταβλητές/ παράμετροι που πρέπει να διευκρινιστούν.

- $E_{b0} = \sqrt{\frac{2*l_0}{c*e_0*n_2}}$ όπου $l_0 = \frac{2*P_0}{\pi*w_0^2}$ η μέγιστη ένταση της δέσμης στην εστία & $w_0 = a * R$ η ακτίνα της δέσμης στην εστία
- $w(z) = w_0 * \sqrt{1 + \left(\frac{z-z_0}{zR}\right)^2}$ η ακτίνα της δέσμης σε κάθε θέση, όπου $zR = \frac{\pi*w_0^2}{wl}$ η & $wl = \frac{\lambda}{n_2}$ & $k = \frac{2*\pi}{wl}$
- $ph(z) = \arctan\left(\frac{z-z_0}{zR}\right)$ η συνιστώσα της φάσης που εξαρτάται μόνο από την απόσταση διάδοσης.

$\epsilon_0=8.85*10^{-12}$ [F/m]

(διηλεκτρική σταθερά του κενού)

$C=3*10^8$ [m/s]

(ταχύτητα του φωτός)

$P=40$ mW

(ισχύς της δέσμης)

$R=0.5\mu\text{m}$ (ακτίνα σωματιδίου)

$m_0 = \pi * 4 * 10^{-7}$ [H/m]

(μαγνητική διαπερατότητα)

$\lambda=1064$ nm

(μήκος κύματος)

$x_0=y_0=0$

(μετατόπιση της δέσμης κατά τον x & y άξονα αντίστοιχα)

$e=0.5$ (ελλειπτικότητα σωματιδίου)

$W_0=a*R$

(διάμετρος της δέσμης στο σημείο εστίασης)

$a=1$

(διάμετρος της δέσμης σε σχέση με την ακτίνα του σωματιδίου)

$z_0=1*10^{-6}\mu\text{m}$

(σημείο εστίασης της δέσμης)

Τέλος σειρά έχουν οι εξισώσεις υπολογισμού των δυνάμεων. Οι δυνάμεις που ασκούνται στο σωματίδιο έχουν προκύψει από την ολοκλήρωση του τανυστή τάσης Maxwell πάνω στην επιφάνεια του σωματιδίου, όπως έχει αναφερθεί και σε πιο πάνω κεφάλαιο. Η συνολική δύναμη που ασκείται πάνω στο σωματίδιο που έχει προκύψει με την προαναφερθείσα ανάλυση με ολοκλήρωση σε ολόκληρη την επιφάνεια του παγιδευμένου σωματιδίου. [79]

$$\langle F \rangle = \iint \left\{ \frac{\epsilon}{2} \text{Re}[(\vec{E} \cdot \vec{n})\vec{E}^* - \frac{\epsilon}{4}(\vec{E} \cdot \vec{E}^*) \cdot \vec{n} + \frac{\mu}{2} \text{Re}[(\vec{H} \cdot \vec{n})\vec{H}^*]] - \frac{\mu}{4}(\vec{H} \cdot \vec{H}^*)\vec{n} \right\} dl'$$

Όπου \vec{n} το κάθετο διάνυσμα σε κάθε θέση στην επιφάνεια του σωματιδίου.

Η τελική μορφή των εξισώσεων της δύναμης που χρησιμοποιήθηκε στο Comsol είναι η

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot n_2^2 \cdot \text{Re} \left((E_x \cdot n_x + E_y \cdot n_y + E_z \cdot n_z) \cdot \overline{E_x} \right) - \frac{1}{4} \cdot \epsilon_0 \cdot n_2^2 \cdot \|E\|^2 \cdot n_x + \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot \text{Re} \left((H_x \cdot n_x + H_y \cdot n_y + H_z \cdot n_z) \cdot \overline{H_x} \right) - \frac{1}{4} \cdot m_0 \cdot \|H\|^2 \cdot n_x$$

$$F_y = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot n_2^2 \cdot \text{Re} \left((E_x \cdot n_x + E_y \cdot n_y + E_z \cdot n_z) \cdot \overline{E_y} \right) - \frac{1}{4} \cdot \epsilon_0 \cdot n_2^2 \cdot \|E\|^2 \cdot n_y \\ + \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot \text{Re} \left((H_x \cdot n_x + H_y \cdot n_y + H_z \cdot n_z) \cdot \overline{H_y} \right) - \frac{1}{4} \cdot m_0 \cdot \|H\|^2 \cdot n_y$$

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot n_2^2 \cdot \text{Re} \left((E_x \cdot n_x + E_y \cdot n_y + E_z \cdot n_z) \cdot \overline{E_z} \right) - \frac{1}{4} \cdot \epsilon_0 \cdot n_2^2 \cdot \|E\|^2 \cdot n_z \\ + \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot \text{Re} \left((H_x \cdot n_x + H_y \cdot n_y + H_z \cdot n_z) \cdot \overline{H_z} \right) - \frac{1}{4} \cdot m_0 \cdot \|H\|^2 \cdot n_z$$

Από τις 3 αυτές εξισώσεις έγινε χρήση της 3^{ης} εξίσωσης, καθώς αυτή είναι παράλληλη στην διεύθυνση διάδοσης, και συνεπώς αυτή η συνιστώσα της δύναμης θα "τραβήξει" το σωματίδιο στην εστία της δέσμης.

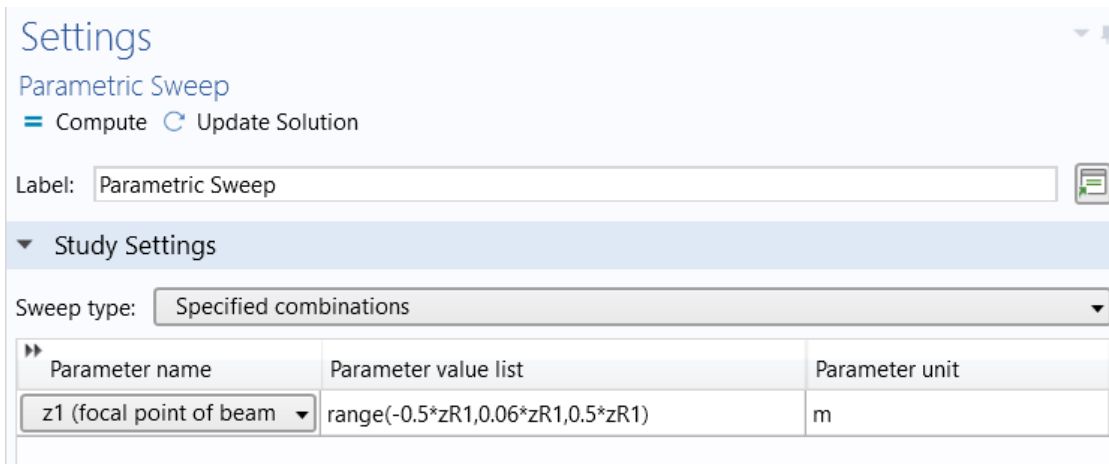
3.2 Περιγραφή διαδικασίας

Όπως έχουμε προαναφέρει σκοπός μας είναι η μελέτη της ακαμψίας της παγίδας, και πως αυτή διαφοροποιείται καθώς μεταβάλλονται η ελλειπτικότητα του κυττάρου (e) και η διάμετρος της δέσμης σε σχέση με την ακτίνα του σωματιδίου (a). Για σκοπούς καλύτερης εξαγωγής συμπερασμάτων, εκτός από τις 2 παραμέτρους που μεταβάλλονταν, έγινε και επανάληψη της ίδιας διαδικασίας για δυο διαφορετικά μήκη κύματος. Τα 2 μήκη κύματος που μελετήθηκαν ήταν $\lambda=1064\text{nm}$ και $\lambda=656\text{nm}$. Τα 2 αυτά μήκη κύματος επιλέχθηκαν με βάση laser που υπάρχουν και στο εργαστήριο (το Nd:Yag και το διοδικό λέιζερ αντίστοιχα), με σκοπό τα συμπεράσματα που θα προκύψουν από την θεωρητική μελέτη να είναι εφαρμόσιμα σε ένα πιθανό μελλοντικό πείραμα.

Στη συνέχεια θα γίνει αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για καλύτερη κατανόηση της. Αρχικά έχουν οριστεί οι κατάλληλες σταθερές/μεταβλητές όπως έχουν περιγραφεί και πιο πάνω.

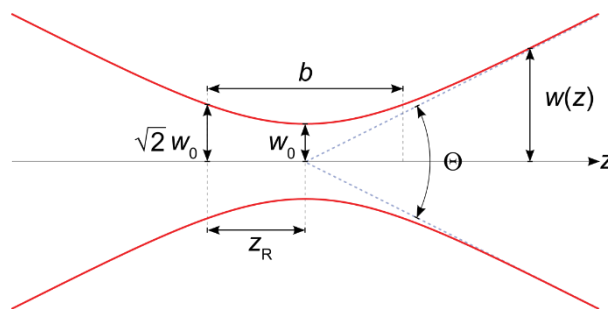
Μέσω της επιλογής Parametric Sweep που υπάρχει στις ρυθμίσεις του COMSOL, επιλέγουμε η παράμετρος η οποία συναρτήσει της θα υπολογίζεται η δύναμη Fz να είναι η z, έτσι ώστε να προσομοιάσουμε την κίνηση του σωματιδίου στην περιοχή της εστίας της δέσμης.

Τα αποτελέσματα που θα έχουμε για το z θα είναι από $-0.5 \cdot \text{Rayleigh range}$ μέχρι $+0.5 \cdot \text{Rayleigh range}$ με βήμα $0,06 \cdot \text{Rayleigh range}$.



Εικόνα 30: Στιγμιότυπο από τη ρύθμιση της παραμέτρου της οποίας συναρτήσει αυτής θα υπολογιστεί η δύναμη F_z .

Rayleigh range (Z_R): Ορίζεται ως η απόσταση από το σημείο εστίασης όπου η ακτίνα της δέσμης γίνεται $\sqrt{2}$ φορές η τιμή της στην εστία, και ισούται με $Z_R = \pi * w_0^2 / \lambda$



Εικόνα 31: Σχηματική αναπαράσταση της σταθεράς Rayleigh range

Ο λόγος που έχει επιλεγεί το συγκεκριμένο εύρος τιμών είναι επειδή η παγίδευση γίνεται στην εστία της δέσμης. Όσο απεστιάζεται η δέσμη και μεγαλώνει η διάμετρος της δεν μπορεί να επιτευχθεί η παγίδευση. Άρα η μελέτη της δύναμης σε αυτές τις αποστάσεις όχι απλά δεν θα εξυπηρετούσε σε κάτι, αντιθέτως θα έκανε την μελέτη πιο δύσκολη αφού το πρόγραμμα θα έπρεπε να δώσει αποτελέσματα για περισσότερες τιμές και συνεπώς θα ήταν πιο χρονοβόρο στο να γίνουν οι υπολογισμοί.

Αφού λοιπόν έχουμε ορίσει σωστά τις απαραίτητες παραμέτρους και το πρόγραμμα έχει κάνει τους απαραίτητους υπολογισμούς, προχωράμε στον υπολογισμό της F_z δύναμης, η οποία δίνεται από το Comsol στην πιο κάτω μορφή. Ακολούθως καταχωρούμε όλα μας τα αποτελέσματα για όλες τις διαφορετικές τιμές των παραμέτρων ϵ, α σε ένα αρχείο Excel του οποίου τα αποτελέσματα και θα παρουσιαστούν στη συνέχεια της διπλωματικής μου εργασίας.

Ακολούθως γίνεται η επεξεργασία των πιο πάνω τιμών που, δηλαδή ο υπολογισμός της κλίσης που σχηματίζουν τα σημεία, καθώς και η δημιουργία της γραφικής τους παράσταση έτσι ώστε να είναι βέβαιο ότι όχι απλά σχηματίζουν μια ευθεία αλλά ευθεία περνάει από το $F_z=0$.

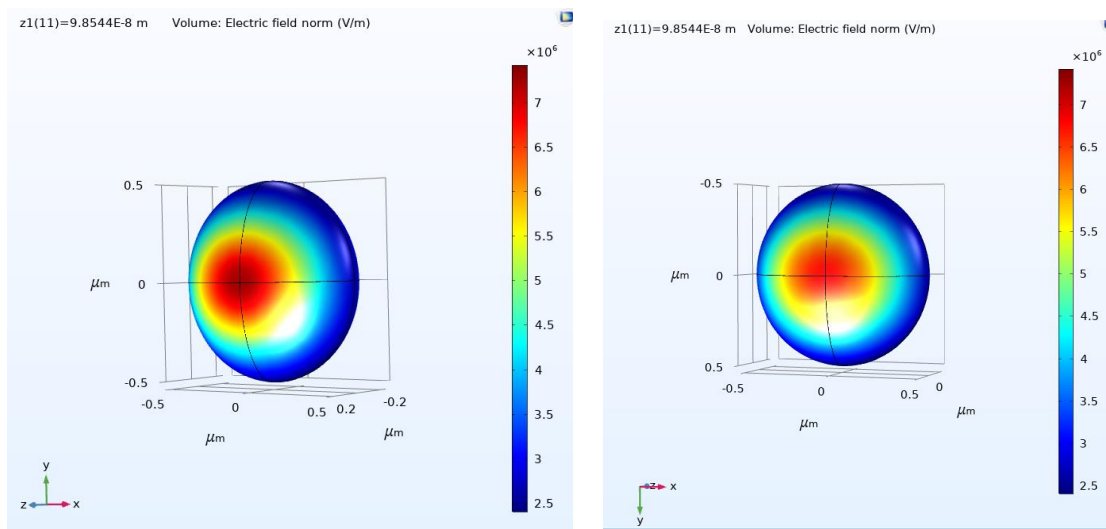
z1 (m)	$0.5 \cdot \epsilon_w \cdot \text{real}((\epsilon_w \cdot \text{Ex} \cdot n_x + \epsilon_w$
-1.1086E-6	1.6600E-12
-9.7558E-7	1.5533E-12
-8.4255E-7	1.4258E-12
-7.0952E-7	1.2775E-12
-5.7648E-7	1.1095E-12
-4.4345E-7	9.2359E-13
-3.1041E-7	7.2234E-13
-1.7738E-7	5.0902E-13
-4.4345E-8	2.8742E-13
8.8689E-8	6.1710E-14
2.2172E-7	-1.6377E-13
3.5476E-7	-3.8467E-13
4.8779E-7	-5.9688E-13
6.2083E-7	-7.9674E-13
7.5386E-7	-9.8118E-13
8.8689E-7	-1.1479E-12
1.0199E-6	-1.2954E-12

ΕΙΚΟΝΑ 32: ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΟΠΩΣ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COMSOL MULTIPHYSICS

3.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων / Συμπερασμάτων

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι μέσω της προσομοίωσης ενός σωματιδίου να καταφέρουμε να αποσπάσουμε όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες.

Αρχικά το πρώτο αποτέλεσμα και αρκετά σημαντικό αποτέλεσμα που εξάγουμε είναι η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου πάνω στην επιφάνεια του σωματιδίου.



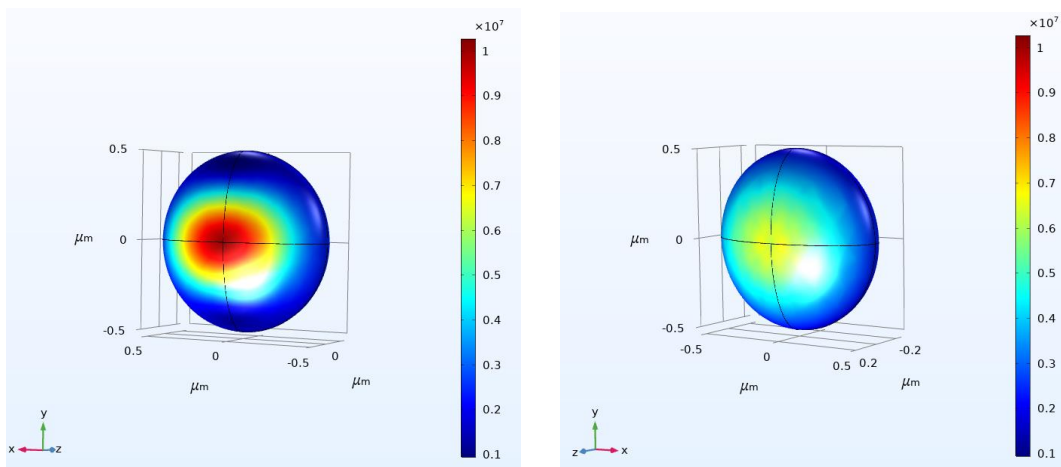
Εικόνα 33: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου [V/m] σε σωματίδιο με $\epsilon=0,5$ και $\alpha=1,0$ από την μπροστά και πίσω πλευρά του.

Στις πιο πάνω εικόνες φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου πάνω στην επιφάνεια του σωματιδίου. Το συγκεκριμένο στιγμιότυπο αφορά κύτταρο με ελλειπτικότητα $e=0.5$ και διάμετρο δέσμης ίση με την ακτίνα του κυττάρου, δηλαδή $a=1$. Η πρώτη εικόνα παρουσιάζει την πλευρά στην οποία προσπίπτει η δέσμη ενώ η δεύτερη είναι η πλευρά από την οποία εξέρχεται. Αυτό μπορεί να επαληθευτεί και από την κατανομή του πεδίου αφού συγκρίνοντας τα 2 κέντρα από το χρωματικό υπόμνημα στην πρώτη εικόνα το κέντρο του σωματιδίου έχει ένα πιο βαθύ κόκκινο χρώμα συνεπώς και πιο ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο. Σε αντίθεση με την δεύτερη εικόνα όπου το κέντρο είναι κόκκινο αλλά λιγότερο βαθύ, γεγονός που υποδηλώνει ότι η ισχύς της δέσμης έχει εξασθενήσει κατά το πέρασμα της από το εσωτερικό του σωματιδίου.

Μια δεύτερη παρατήρηση που προκύπτει αφορά το προφίλ της δέσμης. Από την κατανομή του πεδίου επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι πρόκειται για μια γκαουσιανή δέσμη, αφού η ισχύς στο κέντρο της είναι η μέγιστη ενώ όσο απομακρυνόμαστε μειώνεται.

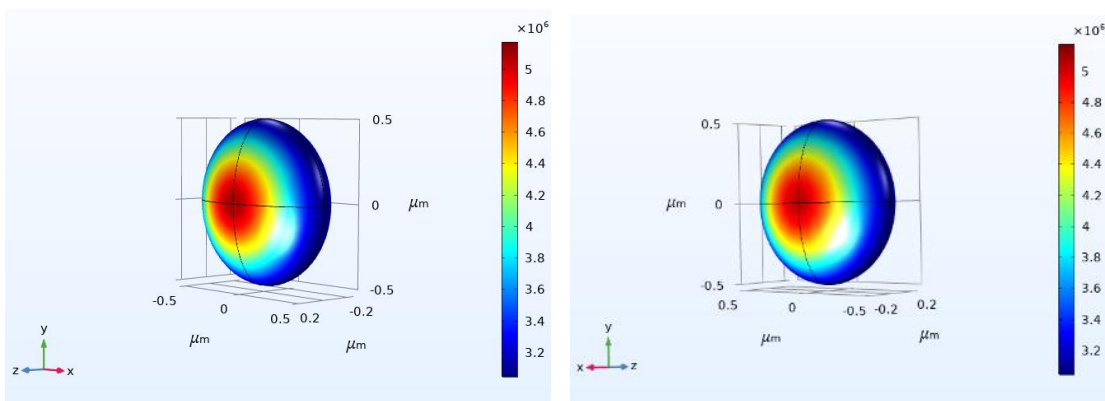
Για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της μεταβλητής a θα παρουσιαστεί και η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου σε σωματίδιο για $a<1$ και $a>1$.

a=0.7 & e=0.5

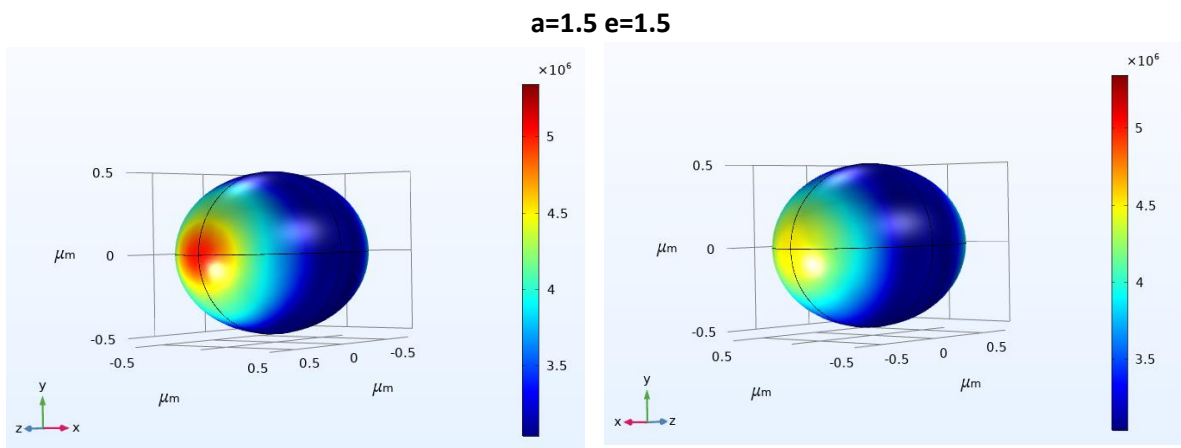


Εικόνα 34: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου [V/m] σε σωματίδιο με $e=0,5$ και $a=0,7$ από την μπροστά και πίσω πλευρά του.

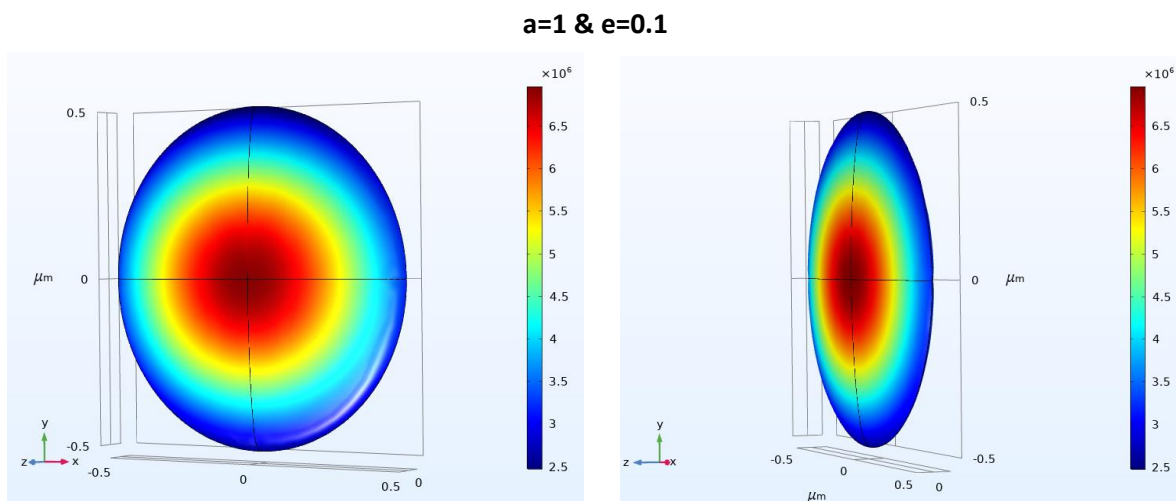
a=1.5 & e=0.5



Εικόνα 35: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου [V/m] σε σωματίδιο με $e=0,5$ και $a=1,5$ από την μπροστά και πίσω πλευρά του.



Εικόνα 36: Η κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου [V/m] σε σωματίδιο με $e=1,5$ και $a=1,5$ από την μπροστά και πίσω πλευρά του.



Εικόνα 37: Η κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου [V/m] σε σωματίδιο με $e=0,1$ και $a=1$ από την μπροστά και πίσω πλευρά του.

Στις πιο πάνω εικόνες παρουσιάζεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου για τις ακραίες τιμές των παραμέτρων a και e , έτσι ώστε να είναι έντονη η διαφοροποίησή τους. Στις εικόνες 34 και 35 τα δυο σωματίδια έχουν το ίδιο σχήμα συνεπώς και την ίδια ελλειπτικότητα ($e=0.5$), αυτό που αλλάζει είναι η διάμετρος της δέσμης σε σχέση με την ακτίνα τους. Όταν η διάμετρος της δέσμης είναι ίση με $1.5 \cdot$ ακτίνα του σωματιδίου, τότε βλέπουμε ότι διαπερνά το σωματίδιο και είναι αρκετά ισχυρή και στο πίσω μέρος του σωματιδίου αφού δεν εξασθενεί ιδιαίτερα. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει στην εικόνα 34 όπου $a=0.7$, αφού το ηλεκτρικό πεδίο όπως παρουσιάζεται από το χρωματικό υπόμνημα είναι ασθενέστερο στο πίσω μέρος του σωματιδίου. Στις εικόνες 36 και 37 παρατηρούμε τις ακραίες τιμές για την παράμετρο της ελλειπτικότητας. Στην εικόνα όπου $e=1.5$ είναι σαν πούρο το σωματίδιο ενώ στην εικόνα με $e=0.1$ το σωματίδιο είναι πολύ λεπτό σαν δίσκος.

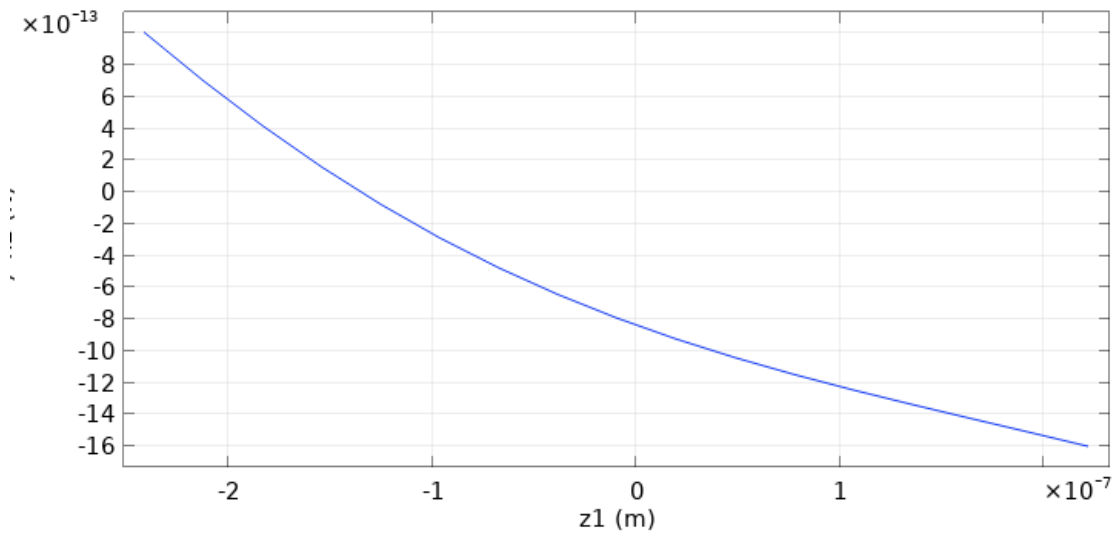
Παράλληλα με τον υπολογισμό της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου υπολογίζουμε και την δύναμη F_z για 2 διαφορετικά μήκη κύματος. Τα 2 διαφορετικά μήκη κύματος που έχουν επιλεγεί είναι $\lambda=1064\text{nm}$ και $\lambda=656\text{nm}$. Το μήκος κύματος $\lambda=1064\text{nm}$ αφορά ένα laser Nd:Yag το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές οπτικής παγίδευσης καθώς είναι γνωστό για την συμβατότητα του με τις βιολογικές εφαρμογές. Επίσης είναι αρκετά αξιόπιστο, σταθερό και μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε παλμικό. Επιπλέον μέσω της γένεσης ανώτερων αρμονικών μπορεί να δώσει και άλλα μήκη κύματος π.χ. 532nm, 355nm, 266nm κ.ο.κ Το 2^ο μήκος κύματος είναι στα 656nm και επιλέχθηκε καθώς υπάρχει το αντίστοιχο διοδικό laser στο εργαστήριο. Η αρχική ιδέα ήταν το μήκος κύματος να είναι στα $\lambda=660\text{nm}$, αλλά παρόλα αυτά στην βιβλιογραφία ο δείκτης διάθλασης του ερυθροκυττάρου δινόταν για 656nm. Αυτό βεβαίως δεν μας ενοχλεί καθώς η απόκλιση αυτή είναι μόλις 4nm. Παράλληλα τα δυο αυτά μήκη κύματος είναι ιδανικά ως προς τις τάξεις μεγέθους που εκπροσωπούν, αφού το ένα είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ακτίνα του σωματιδίου, ενώ το άλλο είναι μεγαλύτερο.

Μέσω του Comsol Multiphysics υπολογίστηκε η δύναμη ως συνάρτηση της θέσης. Στο θεωρητικό μοντέλο όπως έχει παρουσιαστεί και στην πιο πάνω αυτά τα 2 μεγέθη έχουν μια γραμμική εξάρτηση στην περιοχή της παγίδευσης. Δηλαδή η γραφική παράσταση της $F_z=f(z)$ είναι μια ευθεία με αρνητική κλίση δηλ. $F_z=-k.z$. Όλα τα αποτελέσματα που έχουν εξαχθεί έχουν καταχωρηθεί στο αντίστοιχο αρχείο Excel, και στην συνέχεια επεξεργάστηκαν για τον υπολογισμό της κλίσης καθώς και της αντίστοιχης γραφικής παράστασης.

Ένα ενδεικτικό δείγμα του τρόπου επεξεργασίας των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται πιο κάτω.

Ο πίνακας αποτελεσμάτων είναι ο εξής, και τα σημεία αυτά σχηματίζουν την πιο κάτω γραφική παράσταση.

$\lambda=1064\text{nm}$, $a=0.7$, $e=0.7$	
Z[m]	$F_z[\text{N}]$
-2.41E-07	1.01E-12
-2.12E-07	7.02E-13
-1.83E-07	4.19E-13
-1.55E-07	1.60E-13
-1.26E-07	-7.51E-14
-9.66E-08	-2.87E-13
-6.76E-08	-4.75E-13
-3.86E-08	-6.43E-13
-9.66E-09	-7.91E-13
1.93E-08	-9.23E-13
4.83E-08	-1.04E-12
7.73E-08	-1.15E-12
1.06E-07	-1.24E-12
1.35E-07	-1.34E-12
1.64E-07	-1.42E-12
1.93E-07	-1.51E-12
2.22E-07	-1.60E-12



Εικόνα 38: Γραφική παράσταση $F_z=f(z)$ για $\lambda=1064\text{nm}$ και $a=0.7$ και $e=0.7$

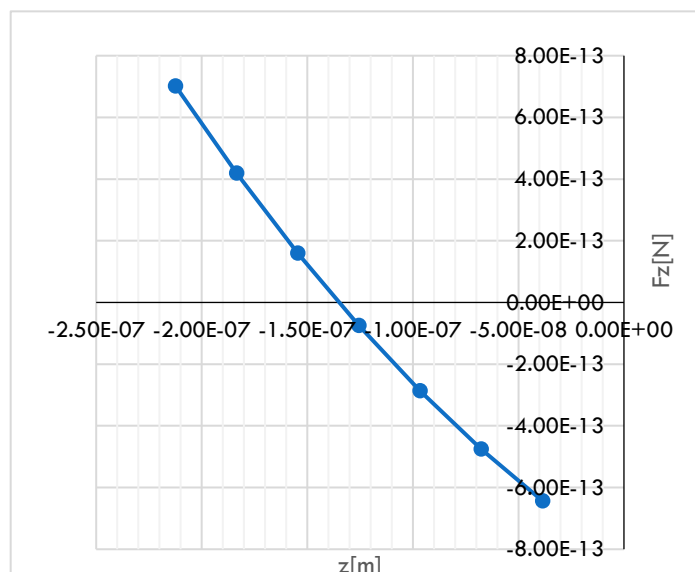
Όπως παρατηρούμε τα πιο πάνω σημεία δεν σχηματίζουν ακριβώς μια ευθεία, έτσι για τον υπολογισμό της κλίσης θα χρησιμοποιήσουμε μόνο τα σημεία που είναι γύρω από το $F_z=0$ και σχηματίζουν την βέλτιστη ευθεία.

Οι τρεις απαραίτητες προϋποθέσεις για την παγίδευση του σωματιδίου είναι οι πιο κάτω.

1. Η γραφική παράσταση που σχηματίζεται από τα σημεία να είναι ευθεία.
2. η κλίση της ευθείας θα πρέπει να είναι αρνητική.
3. Η ευθεία αυτή να περνάει από το $F_z=0$ καθώς αυτό είναι το σημείο ισορροπίας.

Έτσι για την εξαγωγή του σωστού αποτελέσματος της κλίσης της ευθείας, συνεπώς και της ισχύος της παγίδευσης, από τον πιο πάνω πίνακα χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα σημεία.

$z[\text{m}]$	$F_z[\text{N}]$
-2.12E-07	7.02E-13
-1.83E-07	4.19E-13
-1.55E-07	1.60E-13
-1.26E-07	-7.51E-14
-9.66E-08	-2.87E-13
-6.76E-08	-4.75E-13
-3.86E-08	-6.43E-13



Εικόνα 39 Τελική μορφή της γραφικής παράστασης για $a=0.7$ και $e=0.7$.

Με βάση τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία της πιο γραφικής παράστασης υπολογίστηκε η κλίση της ευθείας με την χρήση της συνάρτησης Slope που υπάρχει στο πρόγραμμα Microsoft Excel.

$$\text{Το αποτέλεσμα της κλίσης είναι } k = - 7.73117 \cdot 10^{-6} [N/m]$$

Όπως είναι αναμενόμενο το αποτέλεσμα της κλίσης είναι αρνητικό, αυτό ήταν αναμενόμενο βλέποντας την γραφική παράσταση αλλά και την εξίσωση που συνδέει τα 2 μεγέθη.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν σε πίνακα τα αποτελέσματα από την απόλυτη τιμή των κλίσεων.

- 3.3.1 $\lambda=1064 \text{ nm}$

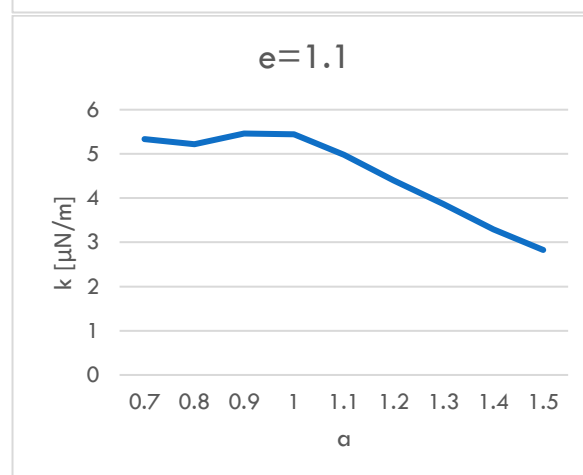
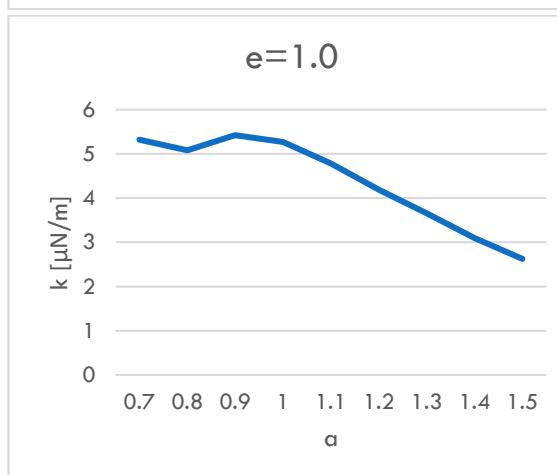
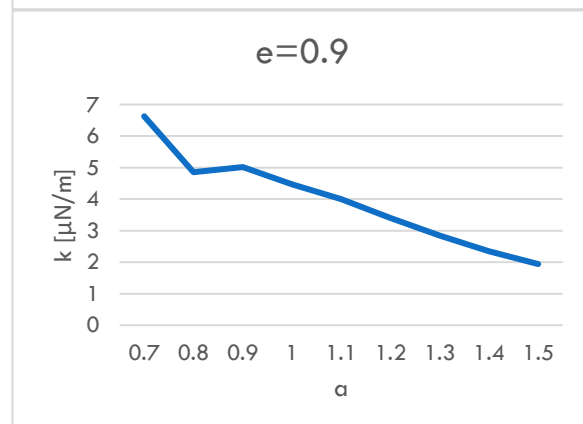
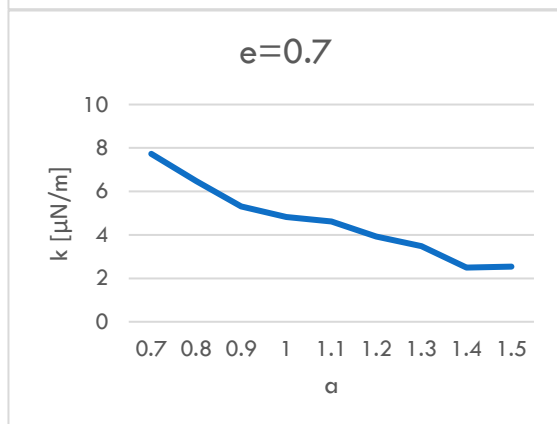
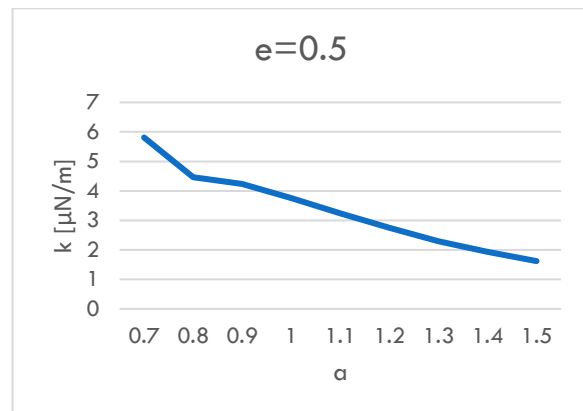
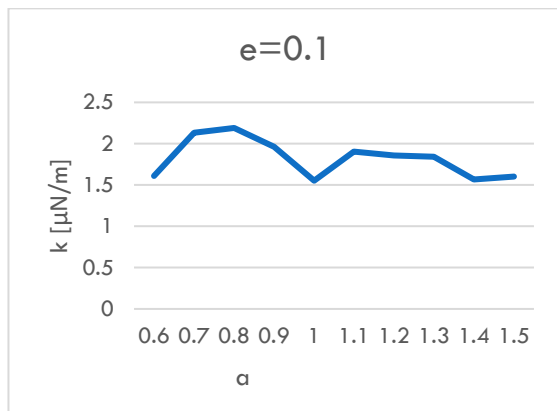
$\alpha \backslash e$	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
0.1		1,61. 10^{-6}	2,1315 $5 \cdot 10^{-6}$	2,1902 $8 \cdot 10^{-6}$	1,961.1 0^{-6}	1,55. 10^{-6}	1,9. 10^{-6}	1,856 $\cdot 10^{-6}$	1,841 $\cdot 10^{-6}$	1,5668 $3 \cdot 10^{-6}$	1,6021 $4 \cdot 10^{-6}$
0.3			4,8740 $5 \cdot 10^{-6}$	3,1533 $4 \cdot 10^{-6}$	2,7702 $8 \cdot 10^{-6}$						
0.5			5,8097 $4 \cdot 10^{-6}$	4,4581 $7 \cdot 10^{-6}$	4,2359 $9 \cdot 10^{-6}$	3,76. 10^{-6}	3,23. 10^{-6}	2,755 $\cdot 10^{-6}$	2,29. 10^{-6}	1,9330 $3 \cdot 10^{-6}$	1,6208 $4 \cdot 10^{-6}$
0.7			7,7311 $7 \cdot 10^{-6}$	6,4706 $7 \cdot 10^{-6}$	5,3035 $5 \cdot 10^{-6}$	4,82. 10^{-6}	4,62. 10^{-6}	3,921 $\cdot 10^{-6}$	3,476 $\cdot 10^{-6}$	2,4939 $8 \cdot 10^{-6}$	2,5449 $2 \cdot 10^{-6}$
0.9			6,6269 $7 \cdot 10^{-6}$	4,8593 $1 \cdot 10^{-6}$	5,0158 $3 \cdot 10^{-6}$	4,47. 10^{-6}	4, 10^{-6}	3,401 $\cdot 10^{-6}$	2,848 $\cdot 10^{-6}$	2,3501 $1 \cdot 10^{-6}$	1,9403 $8 \cdot 10^{-6}$
1			5,3211 $5 \cdot 10^{-6}$	5,0824. 10^{-6}	5,4239 $2 \cdot 10^{-6}$	5,27. 10^{-6}	4,79. 10^{-6}	4,194 $\cdot 10^{-6}$	3,654 $\cdot 10^{-6}$	3,0938 $9 \cdot 10^{-6}$	2,6257 $4 \cdot 10^{-6}$
1.1			5,3378 $8 \cdot 10^{-6}$	5,2172 $3 \cdot 10^{-6}$	5,4612 $6 \cdot 10^{-6}$	5,45. 10^{-6}	4,98. 10^{-6}	4,404 $\cdot 10^{-6}$	3,864 $\cdot 10^{-6}$	3,2922 $3 \cdot 10^{-6}$	2,8271 $5 \cdot 10^{-6}$
1.2			5,5665 $1 \cdot 10^{-6}$	5,3655 $5 \cdot 10^{-6}$	5,3041 $2 \cdot 10^{-6}$	5,55. 10^{-6}	5,05. 10^{-6}	4,486 $\cdot 10^{-6}$	4,041 $\cdot 10^{-6}$	3,4237 $4 \cdot 10^{-6}$	2,9116 $4 \cdot 10^{-6}$
1.3				5,0586 $8 \cdot 10^{-6}$	5,4100 $6 \cdot 10^{-6}$	5,52. 10^{-6}	5,21. 10^{-6}	4,589 $\cdot 10^{-6}$	4,129 $\cdot 10^{-6}$	3,5826 $8 \cdot 10^{-6}$	3,0128 $8 \cdot 10^{-6}$
1.4			5,061. 10^{-6}	4,8990 $9 \cdot 10^{-6}$	5,7766 $5 \cdot 10^{-6}$	5,95. 10^{-6}	5,59. 10^{-6}	5,069 $\cdot 10^{-6}$	4,427 $\cdot 10^{-6}$	3,8519 $5 \cdot 10^{-6}$	3,1939 $8 \cdot 10^{-6}$
1.5			2,8146 $4 \cdot 10^{-6}$	4,8223 $1 \cdot 10^{-6}$	5,8057 $7 \cdot 10^{-6}$	6,25. 10^{-6}	5,89. 10^{-6}	5,301 $\cdot 10^{-6}$	4,573 $\cdot 10^{-6}$	3,9121 $2 \cdot 10^{-6}$	3,3742 $9 \cdot 10^{-6}$

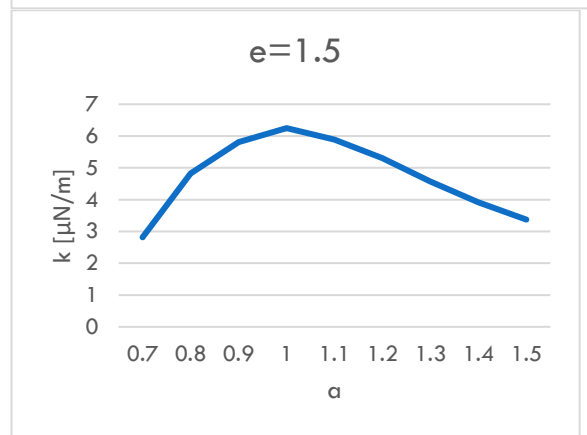
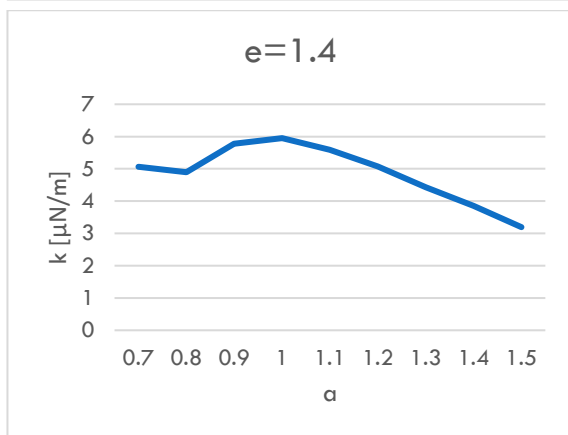
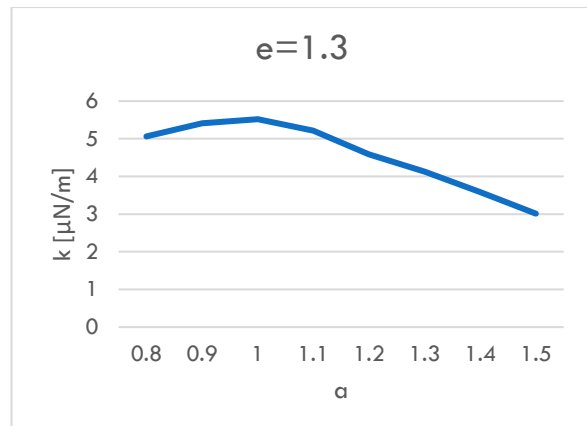
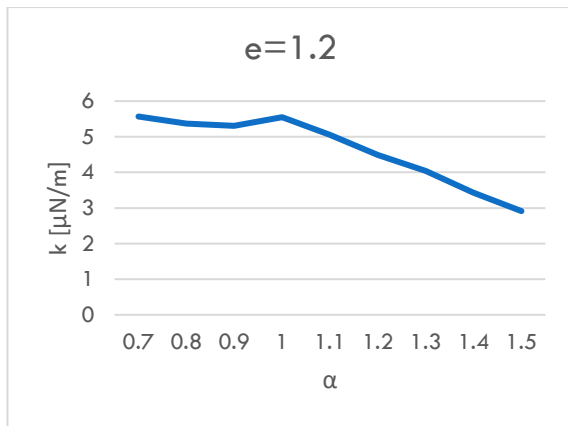
Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τον πιο πάνω πίνακα αποτελεσμάτων, δεν έχουν συμπληρωθεί όλα τα κελιά του πίνακα με το αποτέλεσμα της κλίσης. Αυτό σημαίνει ότι για τις συγκεκριμένες τιμές δεν είναι εφικτή η παγίδευση του σωματιδίου. Στις θέσεις τις οποίες το κελί έχει χρώμα κόκκινο είναι επειδή η ευθεία είχε θετική κλίση, ενώ στα κελιά με μπλε χρώμα η ευθεία δεν

περνούσε από το μηδέν. Το συμπέρασμα βέβαια και στις 2 περιπτώσεις είναι κοινό, ότι δηλαδή δεν ήταν δυνατή η παγίδευση του σωματιδίου.

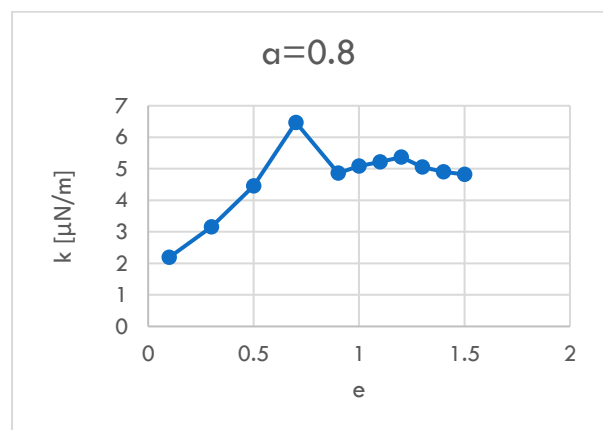
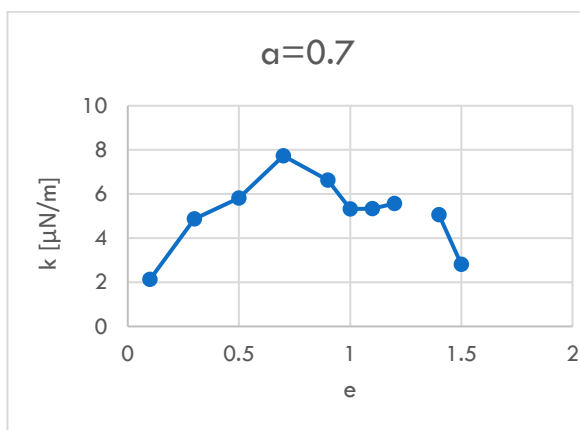
Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις της ισχύς της παγίδευσης ως συνάρτηση της μεταβλητής a , αλλά και της μεταβλητής e . Σκοπός μας είναι να παρατηρήσουμε τις μεταβολές στη δύναμη της παγίδας συναρτήσει της ελλειπτικότητας του κυττάρου (e) καθώς και της διαμέτρου της δέσμης σε σχέση με την ακτίνα του ερυθροκυττάρου (a).

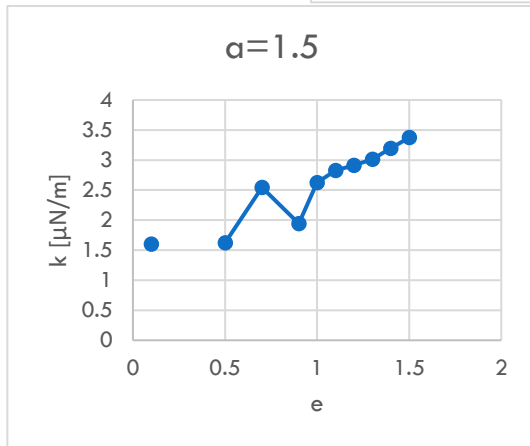
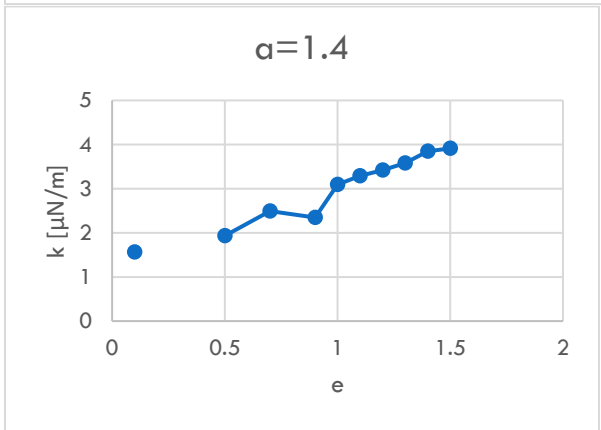
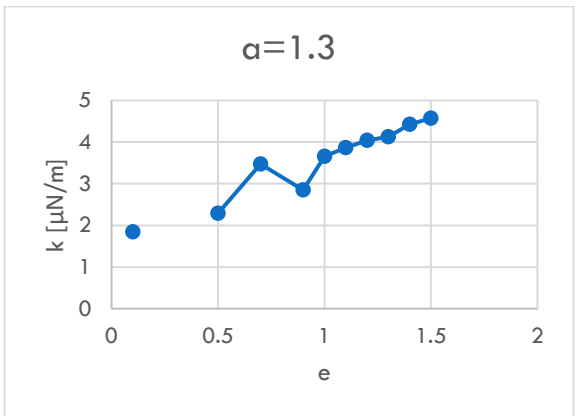
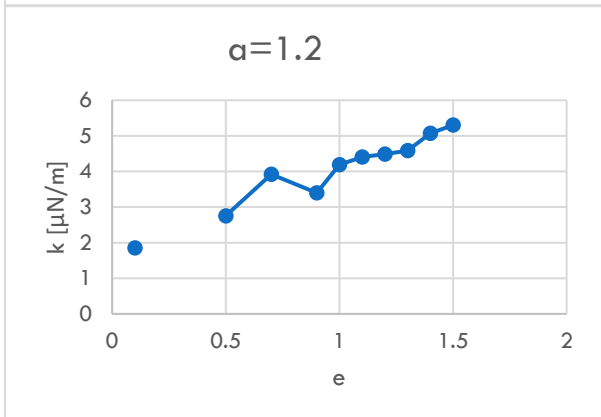
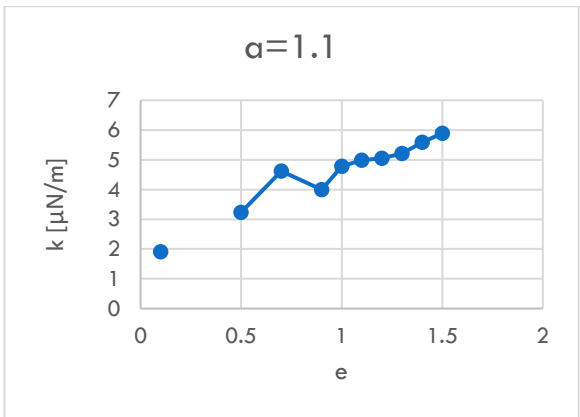
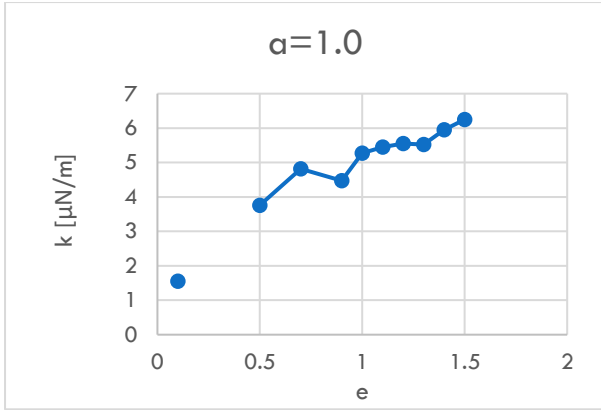
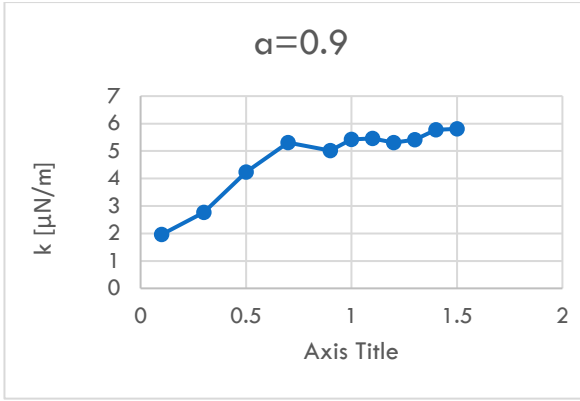
Σε πρώτη φάση θα κρατάμε σταθερή την ελλειπτικότητα e και η γραφική παράσταση θα είναι $k=f(a)$.





Στην συνέχεια για τα ίδια πειραματικά αποτελέσματα με πιο πάνω, φτιάχνουμε τις γραφικές παραστάσεις για τα διαφορετικά α καθώς μεταβάλλεται η ελλειπτικότητα (e) συνεπώς το σχήμα του ερυθροκυττάρου.





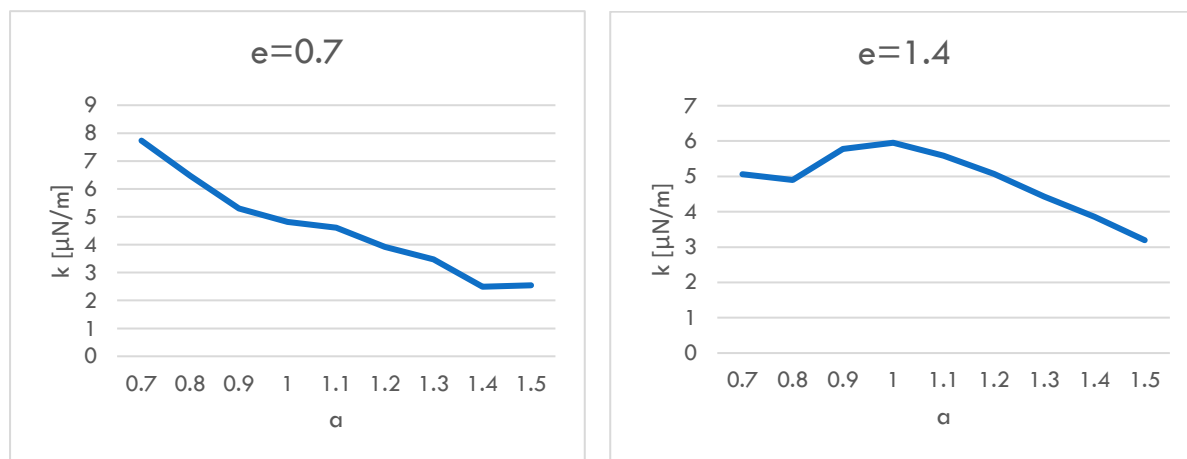
3.3.1.1 Συμπεράσματα για $\lambda=1064$ nm.

Αρχικά η πρώτη παρατήρηση που μπορούμε να δούμε από τον πιο πάνω πίνακα είναι ότι η παγίδευση δεν είναι εφικτή για όλες τις τιμές που εξετάζουμε. Για τις μικρότερες τιμές της παραμέτρου a δηλαδή 0,5 και 0,6 δεν επιτυγχάνεται παγίδευση του κυττάρου καθώς η διάμετρος της δέσμης δεν είναι αρκετά μεγάλη ώστε να είναι ικανή να δημιουργήσει ένα πεδίο αρκετά ισχυρό ώστε να παγιδευτεί κύτταρο με αυτές τις διαστάσεις. Στα κελιά με το κόκκινο χρώμα η γραφική παράσταση ήταν ευθεία που όμως είχε θετική κλίση, ενώ στα κελιά με μπλε χρώμα η ευθεία είχε αρνητική κλίση αλλά δεν περνούσε από το 0 όπως είναι η 2^η απαραίτητη προϋπόθεση που αναφέρθηκε πιο πάνω.

Όπως προκύπτει από τον πίνακα η πιο ισχυρή παγίδα δημιουργείται όταν $a=0,7$ και $e=0,7$ με τιμή $k = -7.73117 \cdot 10^{-6}$ [N/m]. Η τιμή αυτή είναι το τυχαίο παράδειγμα που είχαμε αναφέρει πιο πάνω.

Από τις γραφικές παραστάσεις για το συγκεκριμένο μήκος κύματος μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όσο αυξάνεται η διάμετρος της δέσμης στην περιοχή της παγίδας τόσο μειώνεται η ισχύς της. Στις γραφικές παραστάσεις για τις οποίες ο άξονας x είναι η παράμετρος a και η ελλειπτικότητα του σωματιδίου είναι μικρότερη από 1 τότε η μείωση της ισχύς είναι σχεδόν γραμμική.

Για $e \geq 1$ όπου το σωματίδιο έχει σχήμα πούρου, υπάρχει μείωση της ισχύς αλλά πριν το γραμμικό κομμάτι παρατηρείται μια κορυφή όπου στο σημείο εκείνο η ισχύς της παγίδευσης παίρνει την μέγιστη της τιμή. Η κορυφή αυτή είναι για την τιμή $a \approx 1$, δηλαδή η ακτίνα της δέσμης είναι ίση με την ακτίνα του σωματιδίου.



Εικόνα 40 Γραφικές παραστάσεις για $e=0,7$ και $e=1,4$ όπου φαίνεται η συμπεριφορά που έχει περιγράψει πιο πάνω.

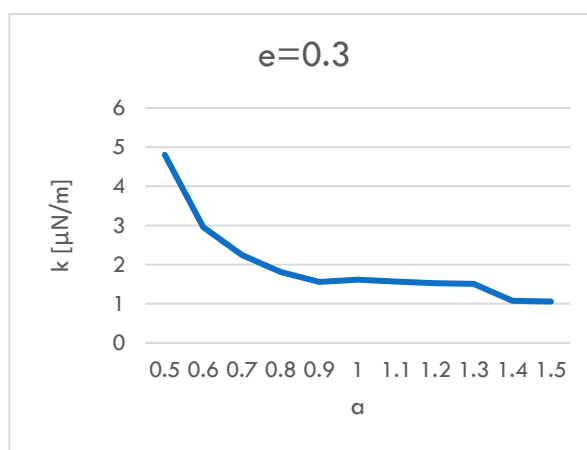
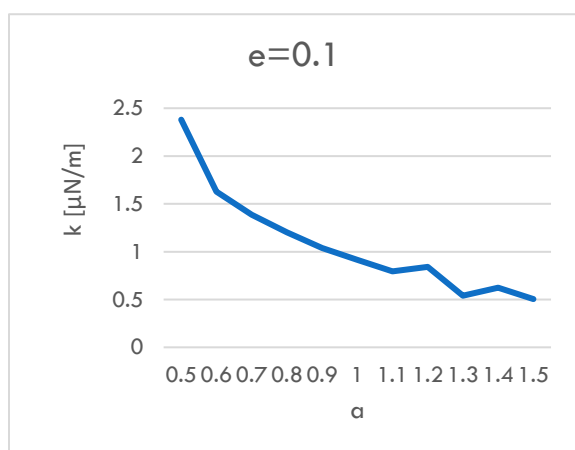
Όταν η υπο μελέτη μεταβλητή είναι η ελλειπτικότητα του κυττάρου (e), παρατηρούμε μια αυξητική τάση στην ακαμψία της παγίδας. Πιο συγκεκριμένα, οι γραφικές παραστάσεις που αφορούν τις τιμές όπου $0.7 \leq a \leq 0.9$ παρατηρείται μια αύξηση στο k μέχρι $e=0,7$ όπου εκεί παρουσιάζεται μέγιστο και μετά η τιμή της ισχύς μειώνεται ξανά.

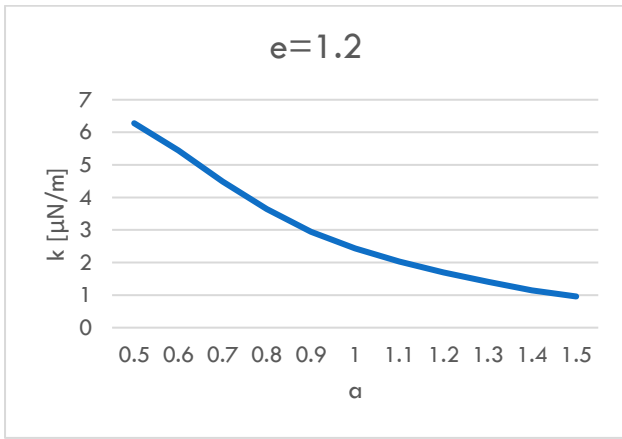
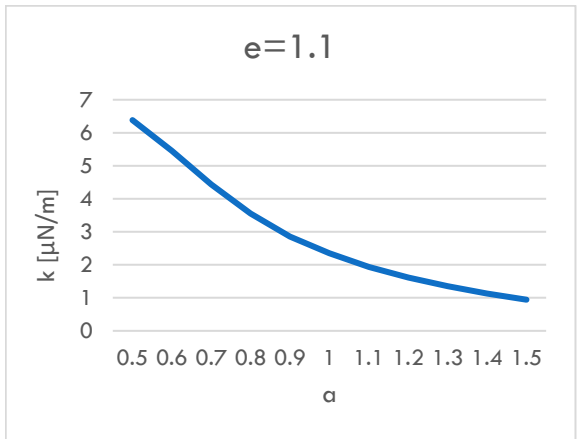
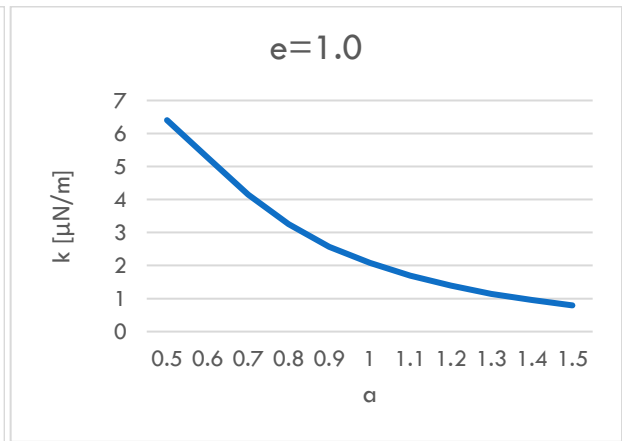
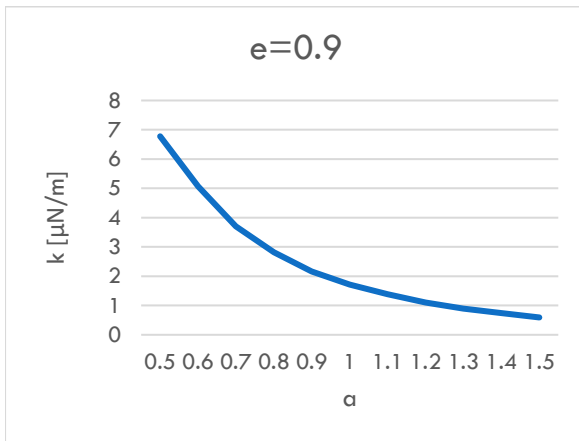
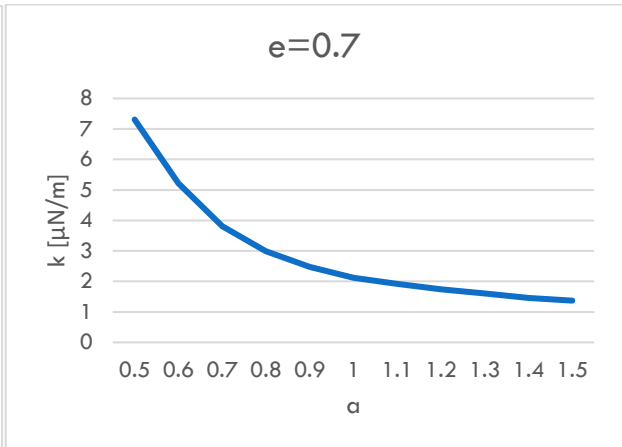
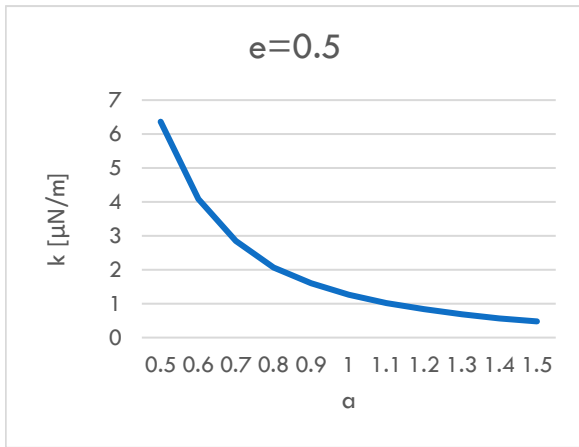
Για $1.0 \leq a \leq 1.5$ όσο αυξάνεται η ελλειπτικότητα του σωματιδίου, δηλαδή αλλάζει το σχήμα του και από δίσκος γίνεται σαν πούρο αυξάνεται αντίστοιχα και η ισχύς της παγίδας.

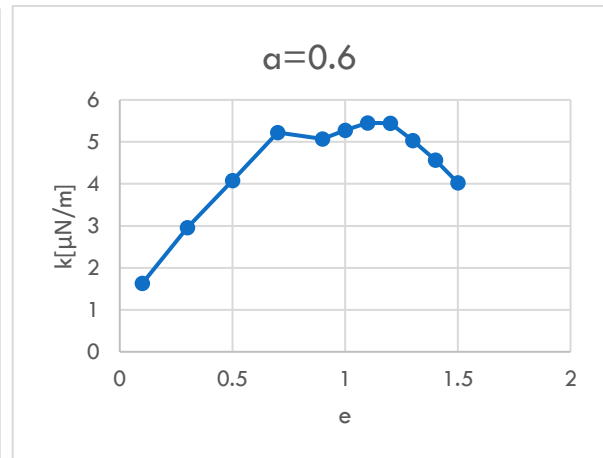
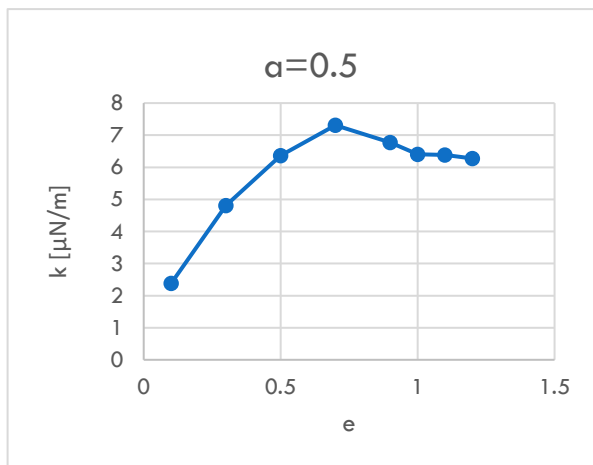
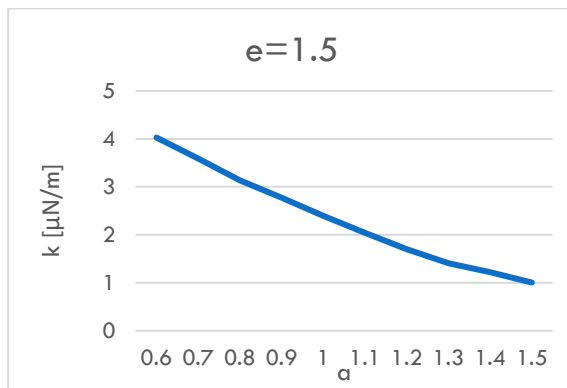
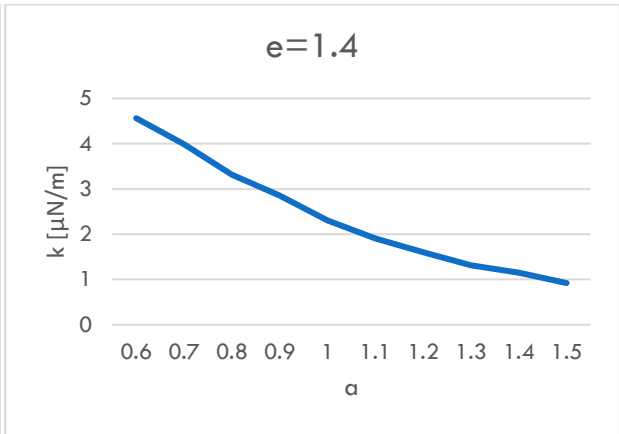
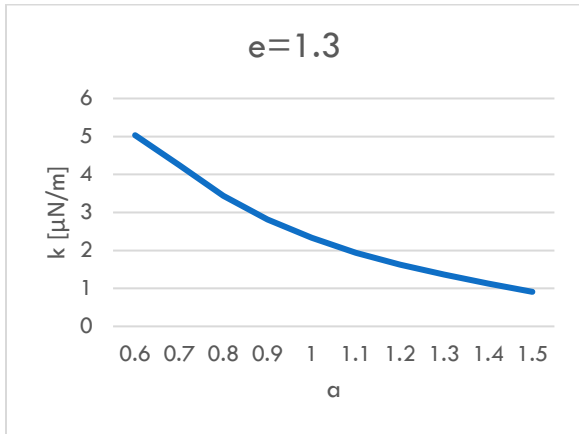
3.3.2 $\lambda=656 \text{ nm}$

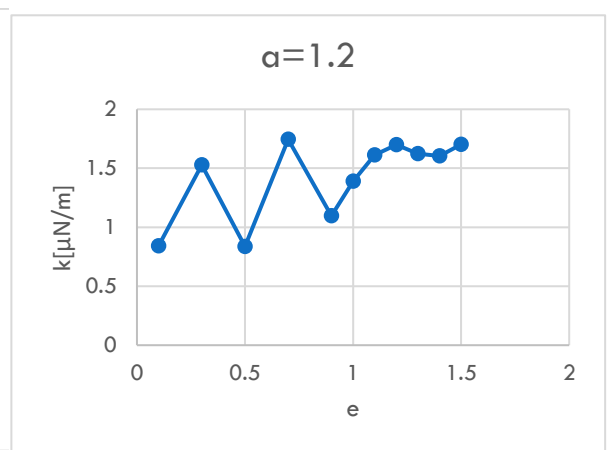
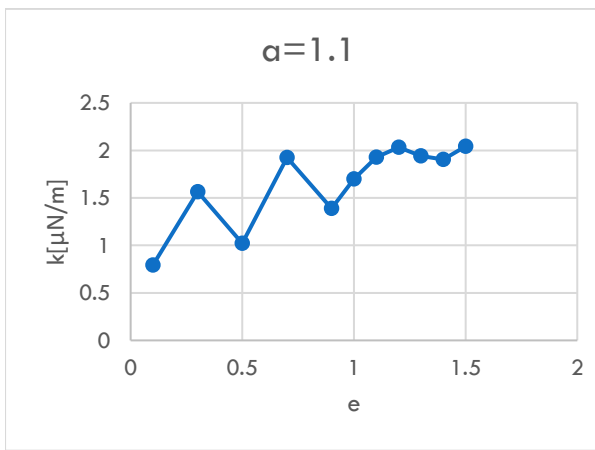
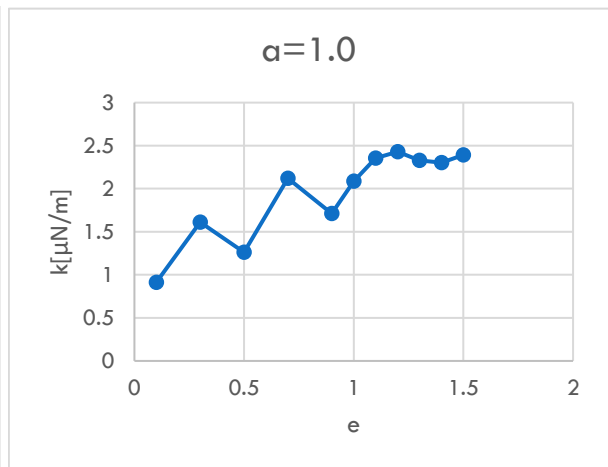
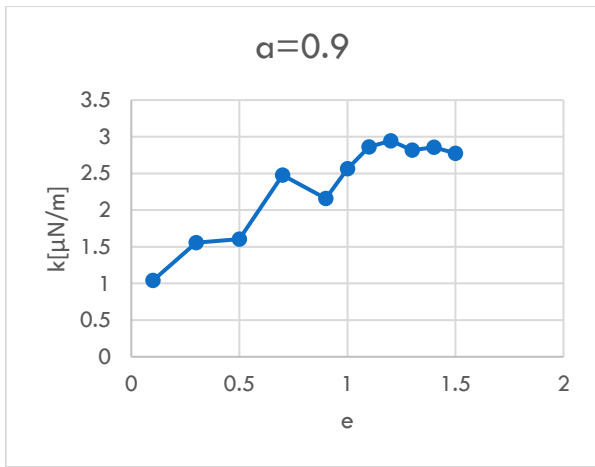
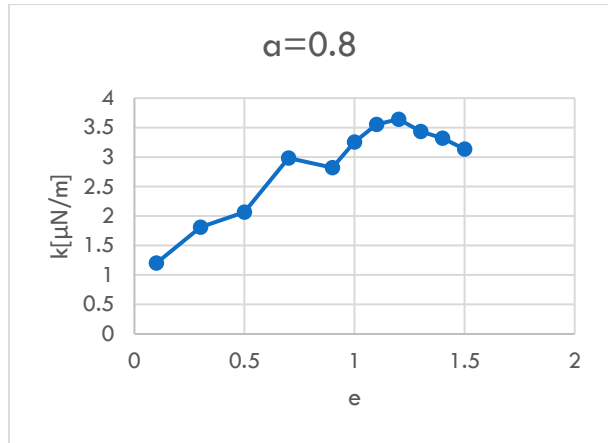
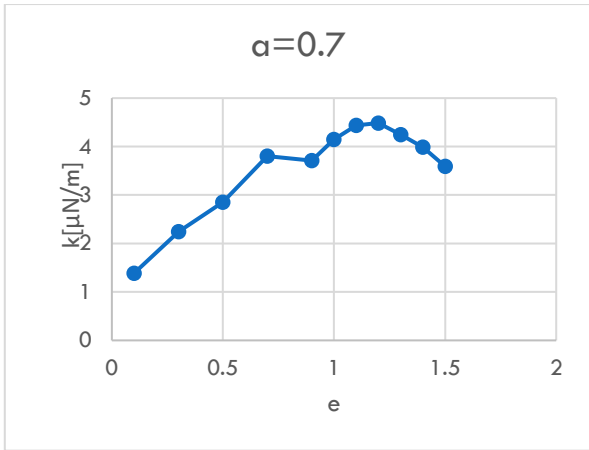
a/e	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
0.1	2.3805 $\cdot 10^{-6}$	1.6285 $\cdot 10^{-6}$	1.387 $\cdot 10^{-6}$	1.2.1 0^{-6}	1.04. 10^{-6}	9.1402 $9 \cdot 10^{-7}$	7.93. 10^{-7}	8.412 $\cdot 10^{-7}$	5.404 $\cdot 10^{-7}$	6.245 $\cdot 10^{-7}$	5.046 $\cdot 10^{-7}$
0.3	4.8051 $\cdot 10^{-6}$	2.9595 $\cdot 10^{-6}$	2.241 $\cdot 10^{-6}$	1.81. 10^{-6}	1.557 $\cdot 10^{-6}$	1.6130 $7 \cdot 10^{-6}$	1.56. 10^{-6}	1.528 $\cdot 10^{-6}$	1.51. 10^{-6}	1.076 $\cdot 10^{-6}$	1.057 $\cdot 10^{-6}$
0.5	6.3639 $\cdot 10^{-6}$	4.0811 $\cdot 10^{-6}$	2.85. 10^{-6}	2.07. 10^{-6}	1.605 $\cdot 10^{-6}$	1.2629. 10^{-6}	1.02. 10^{-6}	8.374 $\cdot 10^{-7}$	6.862 $\cdot 10^{-7}$	5.666 $\cdot 10^{-7}$	4.778 $\cdot 10^{-7}$
0.7	7.3101 $\cdot 10^{-6}$	5.2222 $\cdot 10^{-6}$	3.805 $\cdot 10^{-6}$	2.99. 10^{-6}	2.478 $\cdot 10^{-6}$	2.1192 $4 \cdot 10^{-6}$	1.92. 10^{-6}	1.745 $\cdot 10^{-6}$	1.608 $\cdot 10^{-6}$	1.458 $\cdot 10^{-6}$	1.369 $\cdot 10^{-6}$
0.9	6.7771 $\cdot 10^{-6}$	5.0726 $\cdot 10^{-6}$	3.708 $\cdot 10^{-6}$	2.82. 10^{-6}	2.157 $\cdot 10^{-7}$	1.7114 $1 \cdot 10^{-6}$	1.39. 10^{-6}	1.098 $\cdot 10^{-6}$	8.911 $\cdot 10^{-7}$	7.386 $\cdot 10^{-7}$	5.922 $\cdot 10^{-7}$
1	6.4037 $\cdot 10^{-6}$	5.2737 $\cdot 10^{-6}$	4.147 $\cdot 10^{-6}$	3.26. 10^{-6}	2.563 $\cdot 10^{-6}$	2.0867 $8 \cdot 10^{-6}$	1.7.1 0^{-6}	1.391 $\cdot 10^{-6}$	1.143 $\cdot 10^{-6}$	9.609 $\cdot 10^{-7}$	7.934 $\cdot 10^{-7}$
1.1	6.3831 $\cdot 10^{-6}$	5.4553 $\cdot 10^{-6}$	4.436 $\cdot 10^{-6}$	3.55. 10^{-6}	2.86. 10^{-6}	2.3547 $9 \cdot 10^{-6}$	1.93. 10^{-6}	1.613 $\cdot 10^{-6}$	1.357 $\cdot 10^{-6}$	1.131 $\cdot 10^{-6}$	9.437 $\cdot 10^{-7}$
1.2	6.2787 $\cdot 10^{-6}$	5.442. 10^{-6}	4.486 $\cdot 10^{-6}$	3.64. 10^{-6}	2.946 $\cdot 10^{-6}$	2.4296 $9 \cdot 10^{-6}$	2.03. 10^{-6}	1.699 $\cdot 10^{-6}$	1.413 $\cdot 10^{-6}$	1.144 $\cdot 10^{-6}$	9.578 $\cdot 10^{-7}$
1.3	1.3	5.0329 $\cdot 10^{-6}$	4.244 $\cdot 10^{-6}$	3.44. 10^{-6}	2.817 $\cdot 10^{-6}$	2.3294 $2 \cdot 10^{-6}$	1.94. 10^{-6}	1.624 $\cdot 10^{-6}$	1.366 $\cdot 10^{-6}$	1.127 $\cdot 10^{-6}$	9.095 $\cdot 10^{-7}$
1.4	1.4	4.5645 $\cdot 10^{-6}$	3.986 $\cdot 10^{-6}$	3.32. 10^{-6}	2.856 $\cdot 10^{-6}$	2.3048 $2 \cdot 10^{-6}$	1.91. 10^{-6}	1.604 $\cdot 10^{-6}$	1.311 $\cdot 10^{-6}$	1.152 $\cdot 10^{-6}$	9.218 $\cdot 10^{-7}$
1.5	1.5	4.0276 $\cdot 10^{-6}$	3.589 $\cdot 10^{-6}$	3.14. 10^{-6}	2.776 $\cdot 10^{-6}$	2.3938 $6 \cdot 10^{-6}$	2.04. 10^{-6}	1.703 $\cdot 10^{-6}$	1.407 $\cdot 10^{-6}$	1.219 $\cdot 10^{-6}$	1.006 $\cdot 10^{-6}$

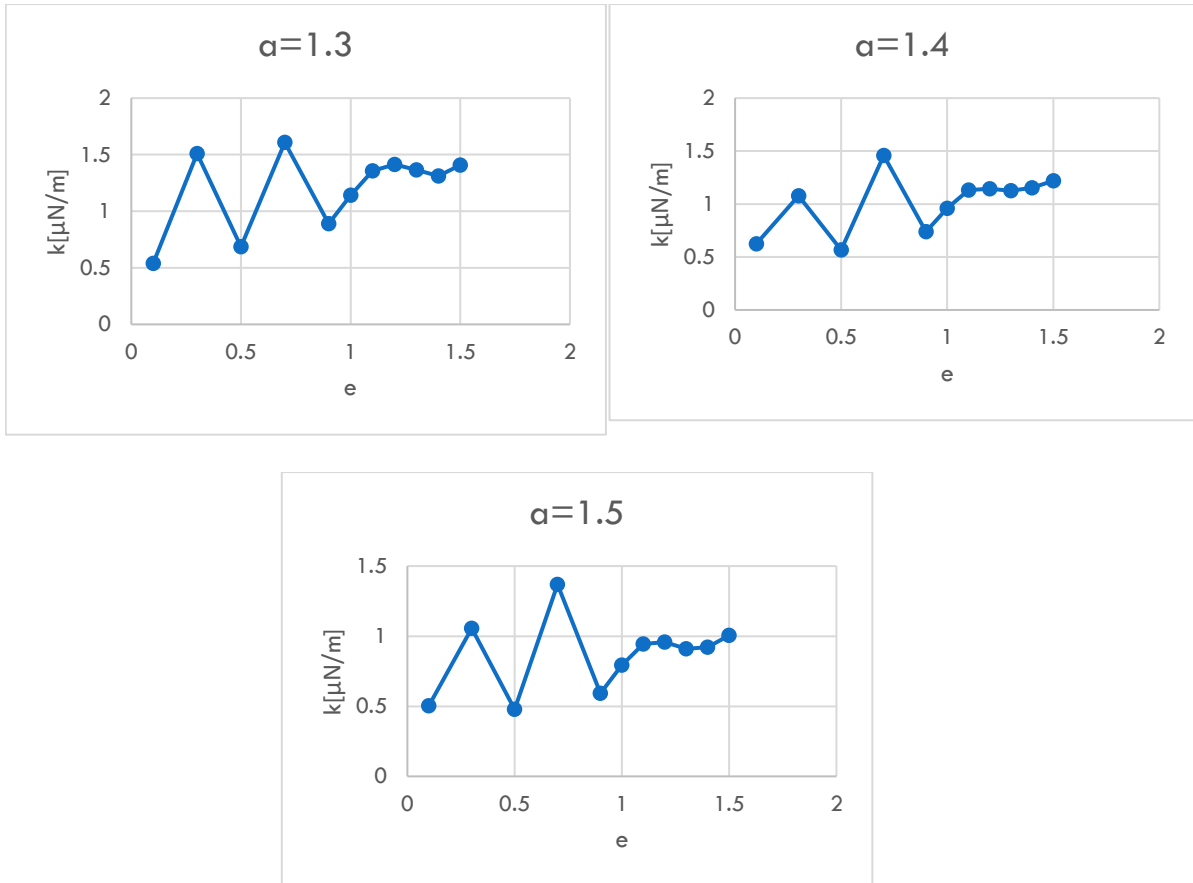
Όπως και πιο πάνω στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις της ακαμψίας της παγίδας ως συνάρτηση της μεταβλητής a, αλλά και της μεταβλητής e.











3.3.2.1 Συμπεράσματα για $\lambda=656 \text{ nm}$.

Κατ'αρχάς η πιο ισχυρή παγίδα επιτυγχάνεται όταν η ελλειπτικότητα του σωματιδίου είναι $e=0.7$ ενώ η ακτίνα της δέσμης είναι η μισή από την ακτίνα του σωματιδίου, δηλ. $\alpha=0,5$ και η τιμή της είναι $k = - 7.3101 \cdot 10^{-6} \text{ [N/m]}$.

Επιπρόσθετα σε αυτό το μήκος κύματος $\lambda=656 \text{ nm}$, καθώς μεταβάλλεται η παράμετρος α για τις διάφορες τιμές της ελλειπτικότητας, βλέπουμε ότι η γραφικές παραστάσεις παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά για όλα τα e . Ειδικότερα, η ισχύς της παγίδευσης μειώνεται καθώς αυξάνεται η διάμετρος της δέσμης σε σχέση με τη διάμετρο του σωματιδίου.

Παρατηρώντας τις γραφικές παραστάσεις στις οποίες μεταβάλλεται η ακαμψία της παγίδας ως συνάρτηση της ελλειπτικότητας μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής. Πρώτο όταν η διάμετρος της δέσμης είναι μικρότερη από την διάμετρο του σωματιδίου ($\alpha < 1$) παρατηρείται ότι η ισχύς της δέσμης παρουσιάζει μέγιστο, το οποίο όσο αυξάνεται το α , μετατοπίζεται για μεγαλύτερες τιμές της ελλειπτικότητας. Δεύτερο συμπέρασμα μπορεί να θεωρηθεί η έντονη ταλαντωτική συμπεριφορά που παρουσιάζει η ισχύς της παγίδας για τις διάφορες τιμές του α , όταν οι δομές έχουν το σχήμα του πούρου, πιο συγκεκριμένα για $e > 1$.

Συγκριτικά και με το προηγούμενο μήκος κύματος, βλέπουμε ότι η βέλτιστη ακαμψία παγίδας παρουσιάζεται όταν $e=0.7$. Οι μέγιστες τιμές της ακαμψίας είναι πολύ κοντά η μια στην άλλη,

$$K_{\lambda=1064\text{nm}} = -7.73117 \cdot 10^{-6} \text{ [N/m]}$$

$$K_{\lambda=656\text{nm}} = -7.3101 \cdot 10^{-6} \text{ [N/m]}$$

Υπάρχει μια απόκλιση 5%. Άρα σε γενικές γραμμές και με τα 2 είδη λέιζερ μπορούμε να δημιουργήσουμε μια εξίσου ισχυρή παγίδα για το συγκεκριμένο είδος παγιδευμένων σωματιδίων. Μια διαπίστωση όμως που δεν θα μπορούσε να περάσει απαρατήρητη είναι ότι για $\lambda=1064\text{nm}$ για τις μικρές τιμές του a ($a=0.5$ & $a=0.6$) η παγίδευση δεν είναι εφικτή σχεδόν για όλες τις τιμές της ελλειπτικότητας. Απ'την άλλη πλευρά για $\lambda=656\text{nm}$ κάτι τέτοιο δεν ισχύει καθώς μόνο για $a=1.5$ & $e=1.4$ και $a=1.5$ & $e=1.5$ δεν μπορεί να παγιδευτεί το σωματίδιο.

3.4 Ακτινική μεταβολή της τοποθέτησης της δέσμης πάνω στο νανοσωματίδιο.

Στις πιο πάνω ενότητες μελετήθηκε η ισχύς της παγίδευσης καθώς μεταβαλλόταν η ελλειπτικότητα του σωματιδίου και η διάμετρος της δέσμης ως προς την ακτίνα του σωματιδίου. ωστόσο είχε οριστεί ότι η εστίαση της δέσμης ήταν στην αρχή των αξόνων, δηλαδή $x=0$, $y=0$.

Σε αυτό το σημείο της εργασίας θα μελετηθεί τι μεταβολές θα μπορούσε να έχει η ισχύς της παγίδας αν η δέσμη δεν εστιαζόταν στο $(0,0)$ αλλά κάπου αλλού πάνω στην επιφάνεια της νανοδομής.

Πριν προχωρήσουμε στην περαιτέρω επεξήγηση καλό θα ήταν να αναφερθεί ότι η συγκεκριμένη μελέτη έγινε για σωματίδια με ελλειπτικότητα $e=0.7$. Ο λόγος που είχε επιλεγεί η συγκεκριμένη τιμή είναι επειδή με βάση τα πιο πάνω αποτελέσματα για αυτή την ελλειπτικότητα είχαμε την μέγιστη ισχύ παγίδευσης. Γι'αυτό παρουσιάζει ενδιαφέρον να δούμε αν θα επιτευχθεί πιο ισχυρή παγίδευση σε περίπτωση που η εστία της δέσμης μεταφερθεί κάπου ακτινικά και όχι στο κέντρο της κυκλικής επιφάνειας.

Οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν ήταν για:

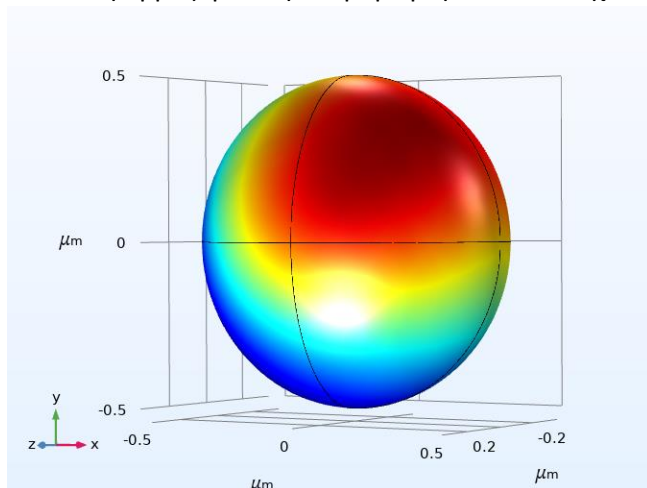
- $x=0.25 \mu\text{m}$ & $y=0.25 \mu\text{m}$
- $x=0 \mu\text{m}$ & $y=0.25 \mu\text{m}$
- $x=0.25 \mu\text{m}$ & $y=0 \mu\text{m}$

Αυτές οι τρεις περιπτώσεις μελετήθηκαν και για τα δύο μήκη κύματος ($\lambda=1064\text{nm}$ & $\lambda=656 \text{nm}$) καθώς και για όλες τις τιμές που μεταβάλλεται η τιμή a (αντίστοιχα με προηγούμενες περιπτώσεις).

3.4.1 $\lambda=1064 \text{ nm}$

$$\underline{x=0.25 \mu\text{m} \ \& \ y=0.25 \mu\text{m}}$$

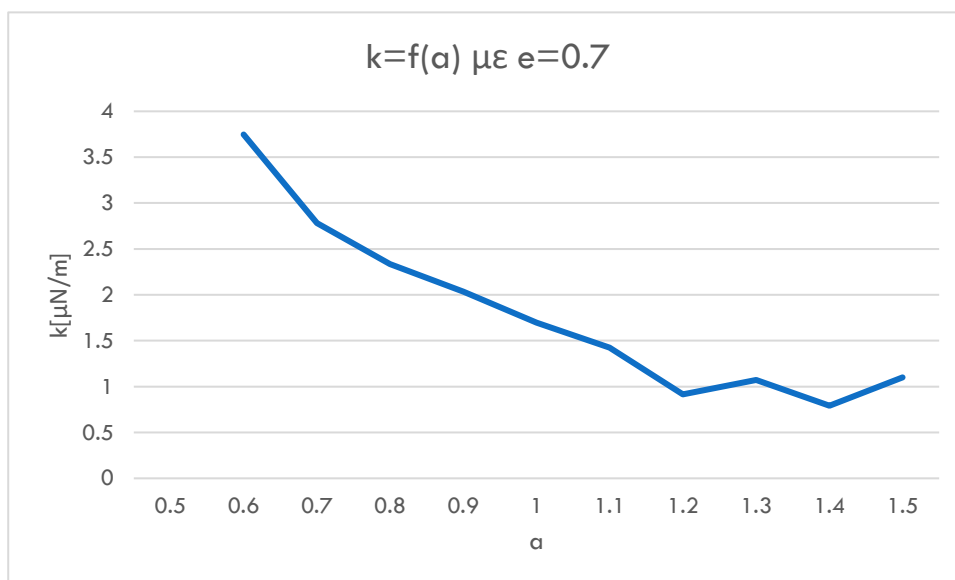
Το εφαρμοζόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο έχει την πιο κάτω μορφή.



Εικόνα 41: Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο πάνω στο σωματίδιο όταν $\epsilon=0.7$, $a=1,5$, $x=0,25\mu\text{m}$, $y=0,25\mu\text{m}$.

A	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
K[N/m]		3,7.1 0 ⁻⁶	2,78.1 0 ⁻⁶	2,33.1 0 ⁻⁶	2,04.1 0 ⁻⁶	1,7.1 0 ⁻⁶	1,4.1 0 ⁻⁶	9,15.1 0 ⁻⁷	1,07.1 0 ⁻⁶	7,92.1 0 ⁻⁷	1,1.1 0 ⁻⁶

Στον πιο πάνω πίνακα εμφανίζεται η απόλυτη τιμή της δύναμης της παγίδας για τις αντίστοιχες τιμές του a . Πιο κάτω παρουσιάζεται η γραφική παράσταση $k=f(a)$.



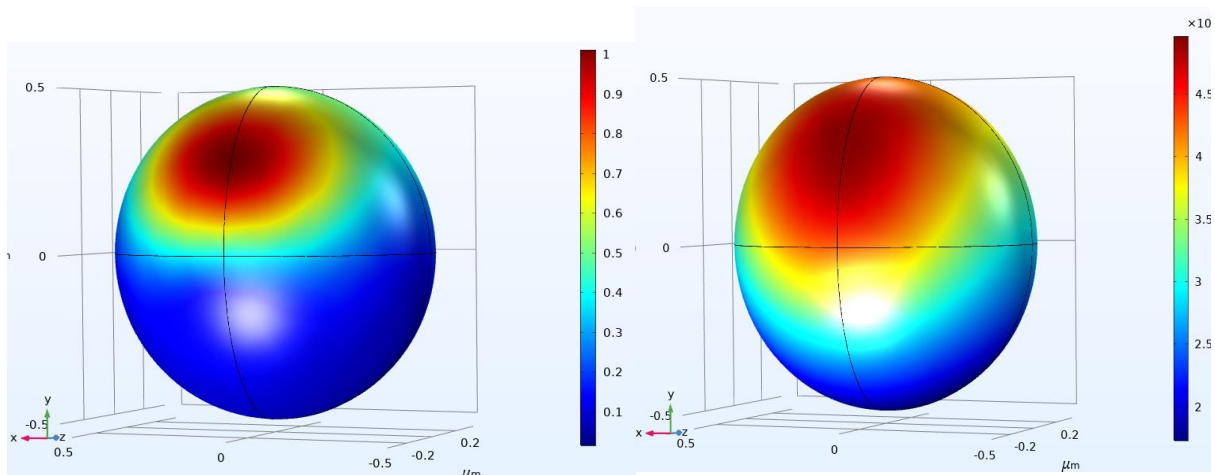
Εικόνα 42: Γραφική παράσταση της ισχύς της παγίδας ως συνάρτηση της μεταβλητής a .

Η συμπεριφορά που παρουσιάζει η συγκεκριμένη γραφική παράσταση είναι ίδια με τις αντίστοιχες γραφικές για $k=f(a)$. Δηλαδή παρατηρούμε μια μείωση της ισχύς της παγίδας όσο αυξάνεται η διάμετρος της δέσμης σε σχέση με την ακτίνα του σωματιδίου.

Το επόμενο συμπέρασμα που μπορούμε να εξαγάγουμε από τον πίνακα τιμών είναι ότι για $e=0.7$ και $a=0.7$ η τιμή του $k=2,78 \cdot 10^{-6} [N/m]$ ενώ η αντίστοιχη τιμή για $x=0$ και $y=0$ είναι κατά πολύ μεγαλύτερη $k=7,73 \cdot 10^{-6} [N/m]$. Ουσιαστικά υπάρχει μια μείωση της τάξεως του 64%. Συνεπώς όχι απλώς δεν παρουσιάστηκε κάποια αύξηση αλλά είχαμε και μια έντονη μείωση στην ισχύ της παγίδας.

$x=0 \mu m$ & $y=0.25 \mu m$

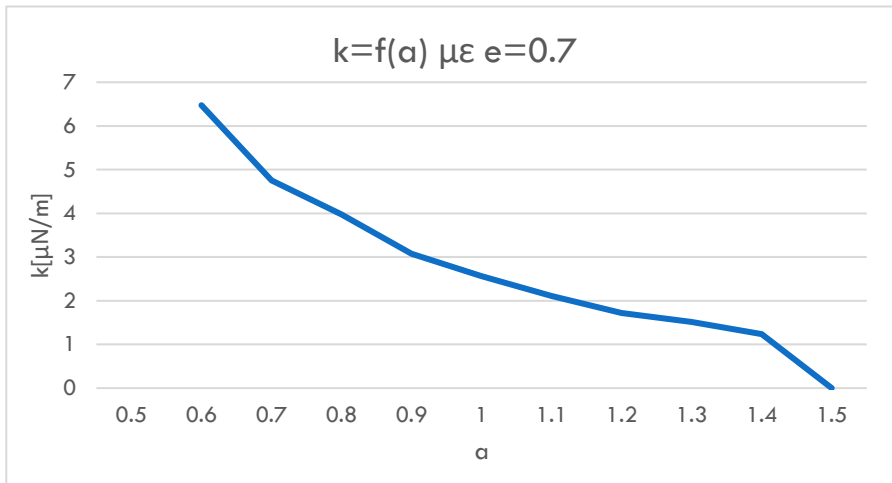
Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο με αυτές τις συντεταγμένες κατανέμεται όπως φαίνεται πιο κάτω.



Εικόνα 43: Κατανομή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου όταν $x=0$ και $y=0.25\mu m$ για A) $a=0.5$ και B) $a=1.5$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σχετικά με την ισχύς της παγίδας εμφανίζονται πιο κάτω σε μορφή πίνακα. Η τιμή της ισχύς που εμφανίζεται είναι η απόλυτη τιμή της κλίσης της ευθείας που σχηματίζουν η δύναμη με την απόσταση z .

A	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
K[$\mu N/m$]	--	6,5	4,8	4,0	3,1	2,6	2,11	1,72	1,51	1,23	--



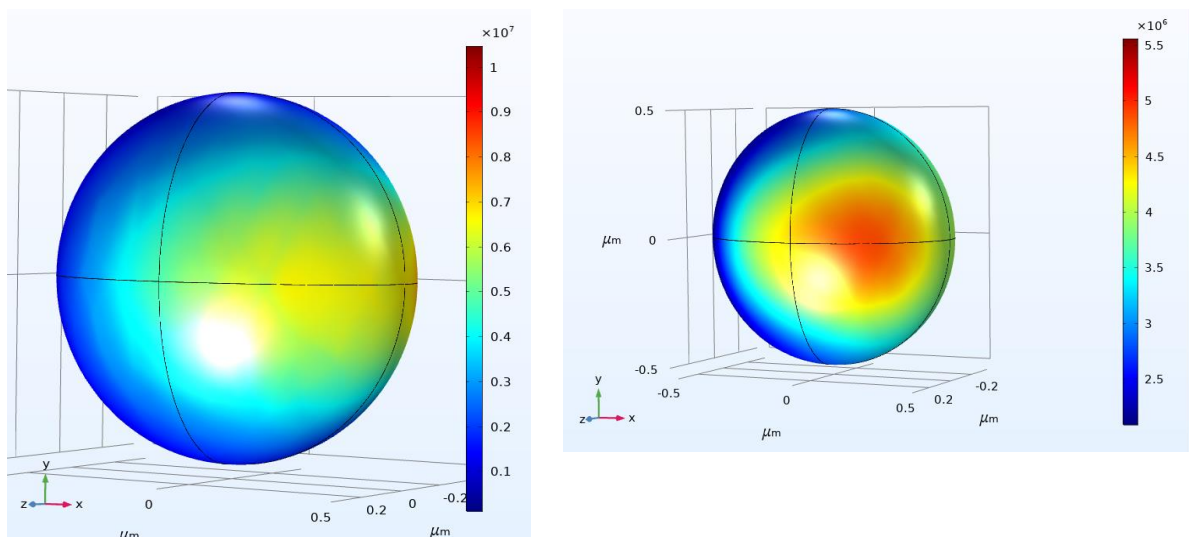
Εικόνα 44: Γραφική παράσταση της ισχύς της παγίδας ως συνάρτηση της μεταβλητής **a**.

Η μορφή της γραφικής παράστασης είναι οικεία, καθώς βλέπουμε την μείωση της ακαμψίας της παγίδας όσο αυξάνεται το **a**.

Επίσης η δύναμη της παγίδας είχε ξανά μείωση της τάσης του 37,9% όσον αφορά την ισχύ για $e=0.7$ και $a=0.7$ όπου για $x=0$ και $y=0$ ήταν η μέγιστη.

Τέλος θα παρουσιαστούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα για

$x=0.25 \mu\text{m}$ και $y=0$

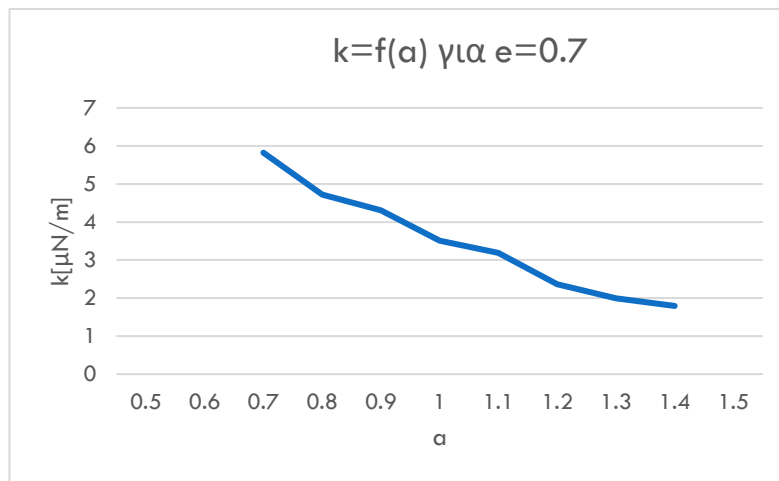


Εικόνα 45: Κατανομή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου όταν $x=0.25\mu\text{m}$ και $y=0$. Στην εικόνα **A)** το $a=0.5$ και στην **B)** $a=1.5$

Από την κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου παρατηρούμε ότι για $a=0.5$ το πεδίο δεν είναι τόσο ισχυρό. Αυτό θα επιβεβαιωθεί και στη συνέχεια όταν θα δούμε τον πίνακα με την ισχύς της παγίδας ως συνάρτηση της μεταβλητής a .

A	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
K[$\mu\text{N}/\text{m}$]	--	--	5.82	4.72	4.31	3.51	3.19	2.36	1.99	1.79	--

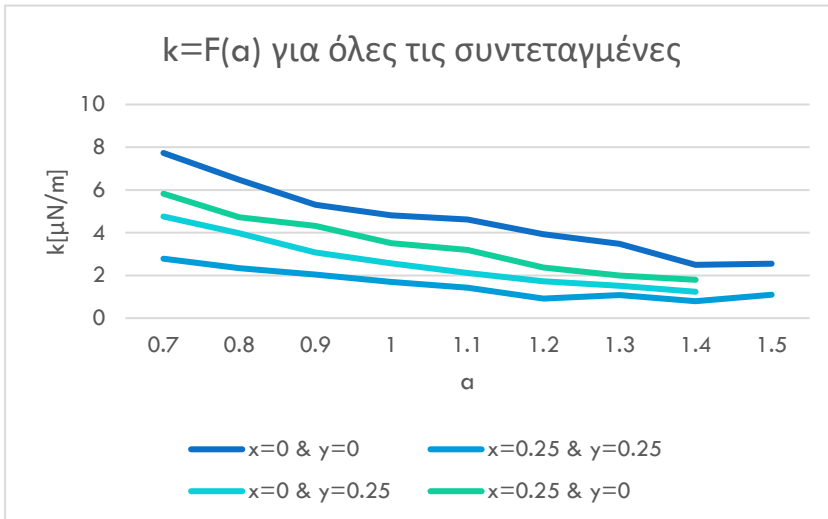
Για $a=0.5$ η παγίδευση δεν είναι εφικτή όπως ούτε και για $a=1.5$. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 45 η δέσμη δεν είναι τόσο εστιασμένη γι' αυτό θα μπορούσαμε να πούμε ότι η αδυναμία για παγίδευση ήταν κάτι που θα μπορούσε να προβλεφθεί πριν καν γίνει η επεξεργασία των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 46: Γραφική παράσταση της ισχύς της παγίδας ως συνάρτηση της μεταβλητής a .

Συμπερασματικά βλέπουμε ότι σε κανένα σημείο η ισχύς της παγίδας δεν είναι μεγαλύτερη απ' ότι όταν η δέσμη εστιάζεται στο σημείο με συντεταγμένες $x=0$ & $y=0$.

	a	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
X=0 μm & y=0 μm	K[$\mu\text{N}/\text{m}$]	--	--	7,73	6,47	5,30	4,82	4,62	3,92	3,47	2,493	2,54
X=0.25 μm & y=0.25 μm	K[$\mu\text{N}/\text{m}$]	--	3,7	2,78	2,33	2,04	1,7	1,4	9,15	1,07	7,92	1,1
X=0 μm & y=0.25 μm	K[$\mu\text{N}/\text{m}$]	--	6,5	4,8	4,0	3,1	2,6	2,11	1,72	1,51	1,23	--
X=0.25 μm & y=0 μm	K[$\mu\text{N}/\text{m}$]	--	--	5.82	4.72	4.31	3.51	3.19	2.36	1.99	1.79	--



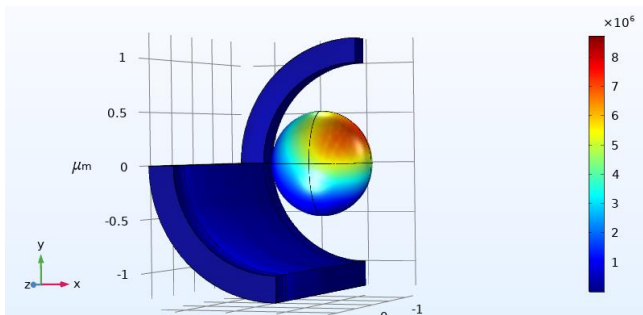
Εικόνα 47: Συνοπτική παρουσίαση όλων των γραφικών παραστάσεων της ισχύς της παγίδας ως συνάρτηση της μεταβλητής a με σταθερή ελλειπτικότητα $e=0.7$.

Στον πιο πάνω πίνακα και στην γραφική παράσταση παρουσιάζονται συνοπτικά όλες οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν σε ακτινική μετατόπιση της δέσμης πάνω στην επιφάνεια του νανοσωματιδίου. Εύλογα κάποιος μπορεί να αναρωτηθεί γιατί δεν χρησιμοποιήθηκαν συντεταγμένες και από άλλα ημισφαίρια του κύκλου. Λόγω συμμετρίας που έχει η γεωμετρία του σωματιδίου δεν θα επηρέαζε το τελικό αποτέλεσμα. Επίσης όπως φάνηκε με κανένα συνδυασμό x & y δεν κατάφερε η ισχύς να γίνει μεγαλύτερη από την προ υπάρχουσα. Επίσης παρατηρήθηκε ότι για $a=1.5$ δεν ήταν εφικτή η παγίδευση σωματιδίου, λόγω του ότι η διάμετρος της δέσμης ήταν αρκετά μεγάλη και ένα μέρος της ήταν εκτός.

3.4.2 $\lambda=656 \text{ nm}$

$x=0.25 \mu\text{m}$ & $y=0.25 \mu\text{m}$

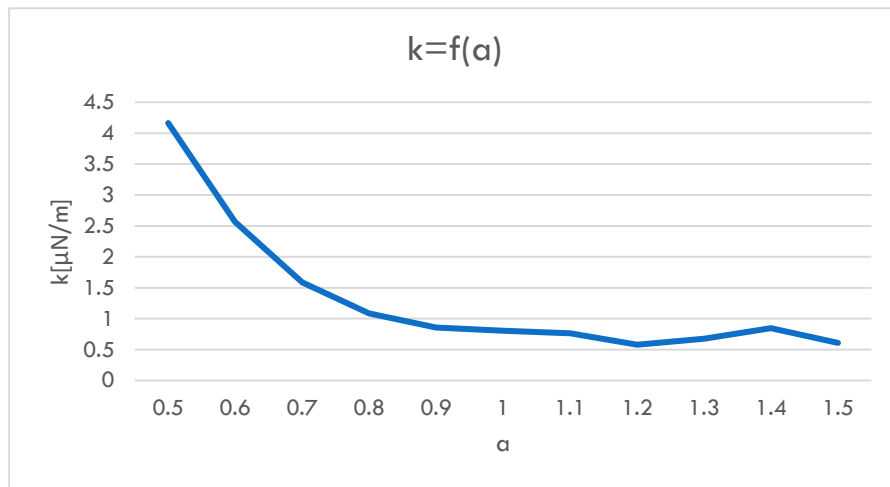
Το εφαρμοζόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στην περίπτωση συγκεκριμένη περίπτωση έχει την πιο κάτω κατανομή.



Εικόνα 48: Κατανομή Ηλεκτρομαγνητικού πεδίου πάνω στην επιφάνεια του νανοσωματιδίου για $x=0.25 \mu\text{m}$ & $y=0.25 \mu\text{m}$

Ο πίνακας των αποτελεσμάτων για την ισχύ της παγίδευσης καθώς και η αντίστοιχη γραφική παράσταση ως συνάρτηση της μεταβλητής a παρουσιάζονται πιο κάτω:

a	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
K[$\mu\text{N/m}$]	4.16	2.57	1.59	1.085518	0.85	0.80	0.76	0.58	0.67	0.84	0.60

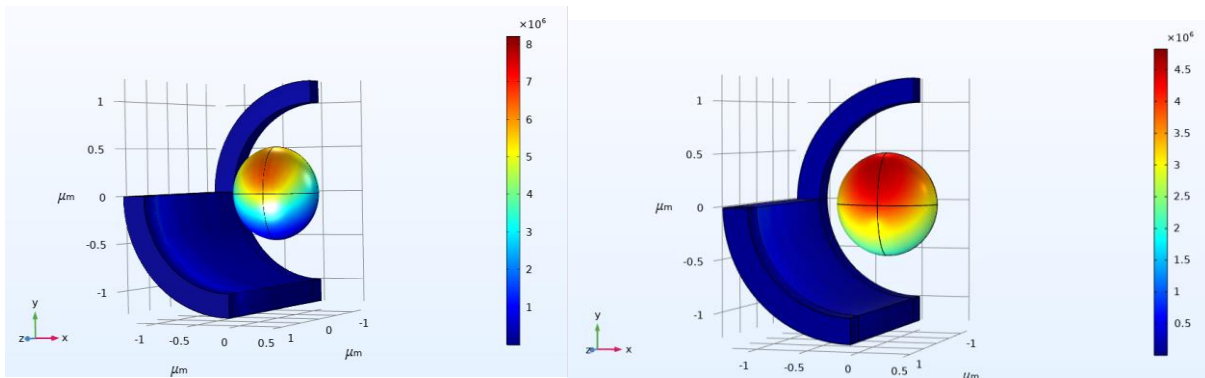


Εικόνα 49: Γραφική παράσταση της ισχύς της παγίδας ως συνάρτηση της μεταβλητής a για $x=0.25\mu\text{m}$ και $y=0.25\mu\text{m}$

Όπως και σε προηγούμενες περιπτώσεις δεν παρουσιάζεται κάποια αξιοσημείωτη διαφορά ως προς την μορφή της γραφικής παράστασης. Υπάρχει αυτή η μείωση που περιμέναμε να παρατηρήσουμε.

$x=0\mu\text{m}$ & $y=0.25\mu\text{m}$

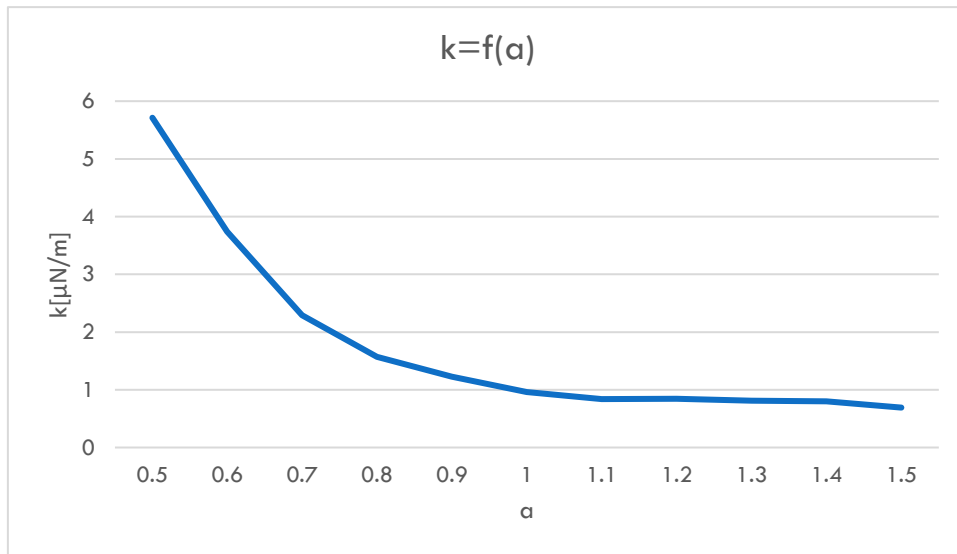
Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και η κατανομή του, είναι η εξής:



Εικόνα 50: Κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου για τις συντεταγμένες $x=0\mu\text{m}$ και $y=0.25\mu\text{m}$. φαίνεται έντονα όσο πιο μεγάλη είναι η διάμετρος της δέσμης για $a=1.5$ σε σχέση με $a=0,5$

Ο πίνακας τιμών της ισχύς της παγίδας ως συνάρτηση της μεταβλητής a , όπως και η γραφική παράσταση παρουσιάζονται πιο κάτω.

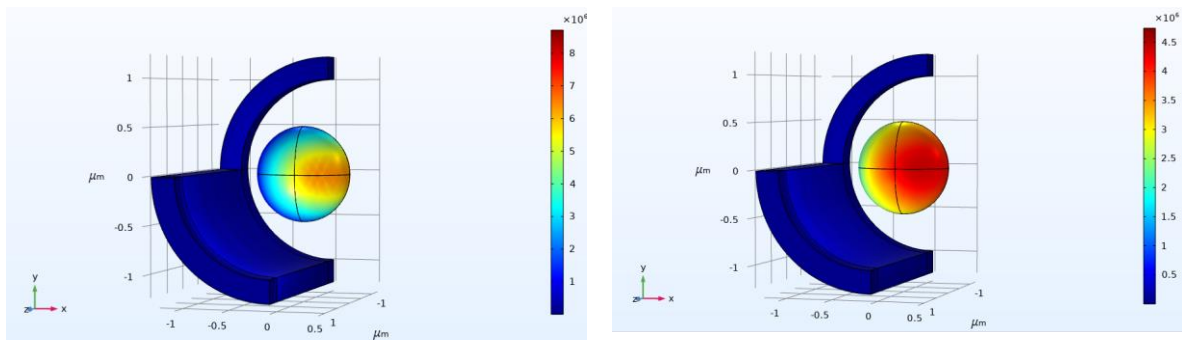
a	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
K[$\mu\text{N}/\text{m}$]	5.71	3.74	2.29	1.57	1.23	0.96	0.84	0.84	0.81	0.80	0.69



Εικόνα 51: Γραφική παράσταση της δύναμης της παγίδας ως συνάρτηση του α .

$x=0.25 \mu\text{m}$ & $y=0 \mu\text{m}$

Κλείνοντας με την τελευταία περίπτωση ακτινικής μεταβολής της δέσμης παρουσιάζεται η αντίστοιχη κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου πάνω στην επιφάνεια του σωματιδίου.

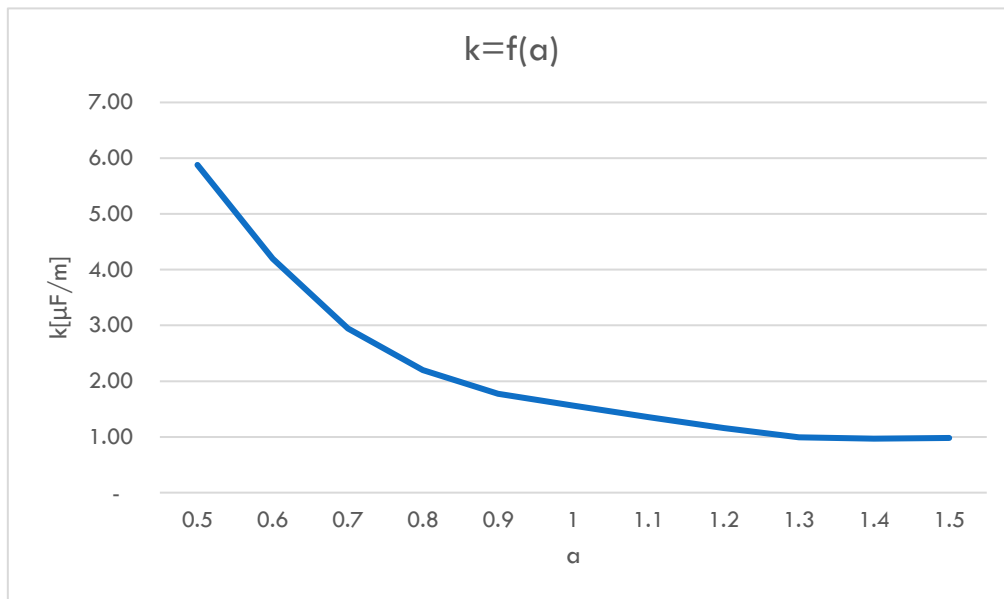


Εικόνα 52: Κατανομή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου όταν η εστία της δέσμης βρίσκεται στις συντεταγμένες $x=0.25\mu\text{m}$ και $y=0 \mu\text{m}$ για $\alpha=0,5$ και $\alpha=1,5$

Ο πίνακας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης μετά από επεξεργασία:

a	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
K[$\mu\text{N}/\text{m}$]	5.88	4.20	2.94	2.20	1.77	1.56	1.35	1.16	0.99	0.97	0.98

Καθώς και ο αντίστοιχη γραφική παράσταση.



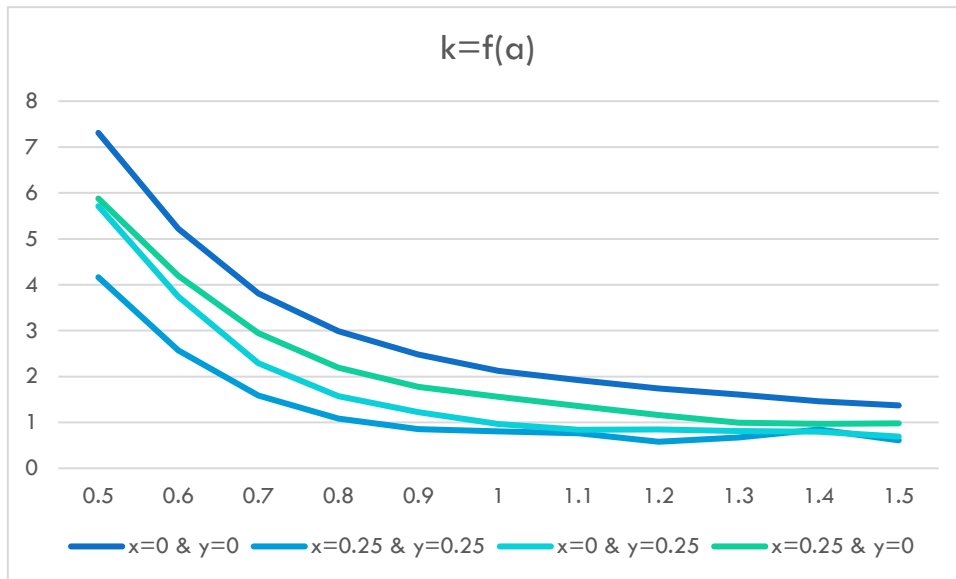
Εικόνα 53: Γραφική παράσταση $k=f(a)$ όταν $x=0.25\mu\text{m}$ και $y=0\mu\text{m}$.

Τέλος θα γίνει μια σύγκριση των πιο πάνω τιμών που προέκυψαν από τις διαφορετικές μετατοπίσεις της δέσμης με τα αρχικά μας αποτελέσματα όπου $x=0\mu\text{m}$ $y=0\mu\text{m}$.

	a	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
X=0μm & y=0 μm	K[μN/m]	7.31	5.22	3.81	2.99	2.48	2.12	1.92	1.74	1.61	1.46	1.37
X=0.25μm & y=0.25 μm	K[μN/m]	4.16	2.57	1.59	1.08	0.85	0.80	0.76	0.58	0.67	0.84	0.60
X=0μm & y=0.25 μm	K[μN/m]	4.16	2.57	1.59	1.08	0.85	0.80	0.76	0.58	0.67	0.84	0.60
X=0.25μm & y=0 μm	K[μN/m]	5.88	4.20	2.94	2.20	1.77	1.56	1.35	1.16	0.99	0.97	0.98

Στην συγκεντρωτική παρουσίαση όλων των αποτελεσμάτων για $e=0.7$ βλέπουμε ότι ο συνδυασμός συντεταγμένων $x=0\mu\text{m}$ & $y=0 \mu\text{m}$ έχει την μεγαλύτερη ισχύ παγίδευσης για όλα τα a .

Η διαπίστωση που μπορούμε να κάνουμε είναι ότι, όταν θέλουμε την πιο ισχυρή παγίδευση θα πρέπει εστία της δέσμης να εστιάζεται στο κέντρο του σωματιδίου και όχι να είναι μετατοπισμένη.



Εικόνα 54: Συνοπτική παρουσίαση όλων των μετατοπίσεων για ελλειπτικότητα = 0,7 και $\lambda=656\text{nm}$

ΚΕΦΆΛΑΙΟ 4 – Μελέτη της οπτικής παγίδευσης ερυθροκυττάρων

4.1 Εισαγωγή

Το καρδιαγγειακό σύστημα είναι το σύστημα οργάνων το οποίο είναι υπεύθυνο για την μεταφορά οξυγόνου και ανταλλαγή θρεπτικών ουσιών σε όλα τα κύτταρα του οργανισμού μέσω της κυκλοφορίας του αίματος. Τα ερυθροκύτταρα αποτελούν ένα από τα κύρια συστατικά του αίματος, επηρεάζοντας άμεσα την μικροκυκλοφορία του. Οι συμβατικές μέθοδοι για τις αναλύσεις αίματος βασίζονται στην μέση απόκριση που έχει ένας μεγάλος αριθμός κυττάρων. Ως εκ τούτου με αυτές τις μεθόδους χάνονται πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες που έχει το κάθε κύτταρο ξεχωριστά όπως και οι αλληλεπιδράσεις που έχουν τα κύτταρα μεταξύ τους. [80]

Τα τελευταία χρόνια η επιστημονική κοινότητα έχει στρέψει το ενδιαφέρον της και στην μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των ερυθροκυττάρων. Η μελέτη των ερυθροκυττάρων κατά την κυκλοφορία τους μέσα στις φλέβες, μπορεί να δώσει πολλές πληροφορίες σχετικά με την υγεία του κυττάρου καθώς και για την αποδοτικότητα της κυκλοφορίας του αίματος.[81] Όταν τα ερυθροκύτταρα περνάνε ανάμεσα στα αιμοφόρα αγγεία υπόκεινται σε έντονη παραμόρφωση, γι' αυτό όταν τα ερυθροκύτταρα αδυνατούν να παραμορφωθούν με τον κατάλληλο τρόπο είτε λόγω κάποιας ασθένειας είτε κάποιας φαρμακευτικής αγωγής δημιουργείται πρόβλημα στην μικροκυκλοφορία του αίματος. Με λίγα λόγια τα ερυθροκύτταρα δεν είναι πλέον ικανά να παραμορφωθούν με τον κατάλληλο τρόπο έτσι ώστε να μπορούν να περάσουν μέσα σε τριχοειδή αγγεία.[82]

Σε αυτό το σημείο θα ασχοληθούμε με το πλήθος των πληροφοριών που μπορεί να μας δώσει η ανάλυση των ερυθροκυττάρων μέσω διατάξεων που βασίζουν την λειτουργία τους στην οπτική παγίδευση.

4.2 Μελέτη ασθενειών των ερυθροκυττάρων με την χρήση της οπτικής λαβίδας

4.2.1 Διαδικασία ερυθροποίησης

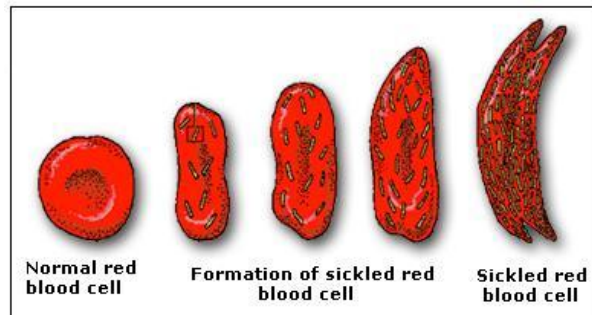
Τα βλαστοκύτταρα μέσω της διαδικασίας της ερυθροποίησης μετατρέπονται σε ώριμα ερυθροκύτταρα, και κατά την μελέτη των διαφορετικών σταδίων της μετατροπής αυτής παρατηρούνται δραματικές αλλαγές στο σχήμα, στη σύσταση των κυττάρων, όσο και στις μηχανικές ιδιότητες της κυτταρικής μεμβράνης. Με τη χρήση διατάξεων οπτικής παγίδευσης μπορεί να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας της ερυθροποίησης καθώς και να ανακαλυφθεί η οποιαδήποτε αλλοίωση που πιθανόν να οφείλεται σε παθολογικούς παράγοντες. [83][84]

4.2.2 Δρεπανοκυτταρική αναιμία

Μια από τις ασθένειες που η οπτική λαβίδα έχει καίριο ρόλο τόσο στην διάγνωση τόσο και στη θεραπεία της είναι η δρεπανοκυτταρική νόσος (Sickle Cell Disease -SCD). Η νόσος αυτή έχει σαν κύριο χαρακτηριστικό την αλλαγή και παραμόρφωση του σχήματος των ερυθροκυττάρων με αποτέλεσμα να έχουν ένα αλλοιωμένο σχήμα όπως φαίνεται πιο κάτω.



Εικόνα 56: Σχηματική διαφορά ενός υγιούς ερυθροκυττάρου και ενός με δρεπανοκυτταρική νόσο.



Εικόνα 55: Σταδιακή μετάλλαξη του ερυθροκυττάρου λόγω της δρεπανοκυτταρικής αναιμίας

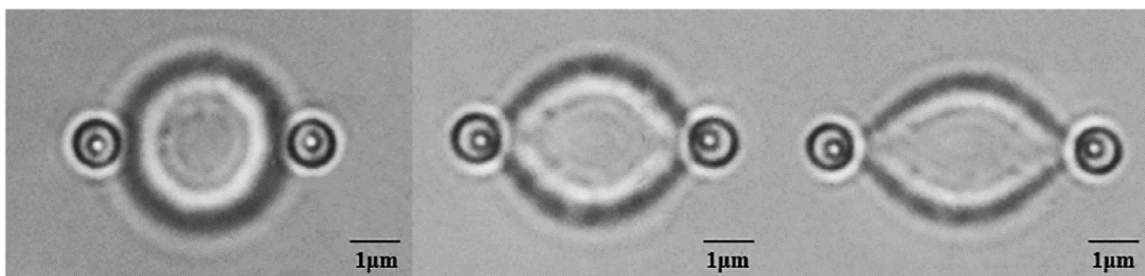
Μια πολύ κοινή μορφή της δρεπανοκυτταρικής νόσου είναι η δρεπανοκυτταρική αναιμία, η οποία οφείλεται σε γενετικούς παράγοντες όπου έχουμε ανωμαλία στο β-γονίδιο με αποτέλεσμα να έχουμε αλλοίωση στο 11^ο χρωμόσωμα. Η αιμοσφαιρίνη η οποία είναι ένα από τα κύρια συστατικά του αίματος είναι αυτή που δημιουργεί δεσμούς με το οξυγόνο από τους πνεύμονες και το μεταφέρει σε όλους τους ιστούς του σώματος. Σε περίπτωση αναιμίας η αιμοσφαιρίνη δεν δημιουργεί τους απαραίτητους δεσμούς με το οξυγόνο, λόγω του αλλοιωμένου της σχήμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα ερυθροκύτταρα να έχουν και αυτά αλλοιωμένο σχήμα, και να είναι άκαμπτα και κολλώδες. Χάρη σε αυτό τα ερυθροκύτταρα δεν μπορούν να περάσουν με την ίδια ευκολία μέσα στις φλέβες με αποτέλεσμα να δημιουργείται απόφραξη των αιμοφόρων αγγείων στην μικροκυκλοφορία του αίματος. [85].

Οι πιο διαδεδομένες θεραπείες για τη δρεπανοκυτταρική αναιμία είναι χρήση της χημικής ουσίας υδροξυκαρβαμίδιο ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}_2$), καθώς και η ενδοφλέβια μετάγγιση υγιών ερυθροκυττάρων στην κυκλοφορία του αίματος. Μέσω της οπτικής παγίδευσης εξετάζεται η αποτελεσματικότητα του φαρμάκου, μετρώντας την ελαστικότητα καθώς και το ιξώδες της κυτταρικής μεμβράνης των ερυθροκυττάρων. Οι μετρήσεις των δυο μεγεθών γίνονται ως εξής. Η δέση laser παγιδεύει το ερυθροκύτταρο και το κινεί με διαφορετικές ταχύτητες μέσα σε πλάσμα αίματος με δεδομένο ιξώδες. Έχοντας υπολογίσει την δύναμη που ασκεί το laser στο ερυθροκύτταρο, καθώς και την δύναμη που ασκείται στο ερυθροκύτταρο λόγω της κίνησης του μέσα στο πλάσμα μπορούμε πλέον να προχωρήσουμε στους υπολογισμούς των επιθυμητών μεγεθών. Γνωρίζοντας ότι στο σημείο ισορροπίας η συνολική δύναμη που ασκείται στο ερυθροκύτταρο είναι 3μηδέν, άρα μπορεί να υπολογιστεί και η ολική ελαστικότητα του υπο εξέταση ερυθροκυττάρου. Επίσης στο σημείο ισορροπίας εξετάζεται και η επιμήκυνση του ερυθροκυττάρου. Η πιο πάνω είναι μια πολύ συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας, αλλά μέσω κατάλληλων υπολογισμών προκύπτουν τα επιθυμητά αποτελέσματα/συμπεράσματα.[86]

4.2.3 Οξειδωτικό στρες στα ερυθροκύτταρα

Τα τελευταία χρόνια η επιστημονική κοινότητα έχει στρέψει το ενδιαφέρον της και στην μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των ερυθροκυττάρων που βρίσκονται υπο οξειδωτικό στρες. Κύριος λόγος του επιστημονικού ενδιαφέροντος είναι η μελέτη της νόσου του Parkinson. Η νόσος του Parkinson είναι μια νευροεκφυλιστική διαταραχή της οποίας τα αίτια δεν έχουν διευκρινιστεί πλήρως, έχει όμως παρατηρηθεί ότι το οξειδωτικό στρες είναι ένας σημαντικός παράγοντας. Το οξειδωτικό στρες οφείλεται διαταραχή της ισορροπίας «καταστροφής» και «δημιουργίας» ελευθέρων ριζών από τον οργανισμό με αποτέλεσμα οι ελεύθερες ρίζες να επιτίθενται και σε υγιή κύτταρα, να τα οξειδώνουν και συνεπώς να τα καταστρέφουν. Τα ερυθροκύτταρα δεν αποτελούν εξαίρεση στο οξειδωτικό στρες. Η μελέτη των μορφολογικών και μηχανικών ιδιοτήτων των ερυθροκυττάρων που βρίσκονται υπό την επίδραση οξειδωτικού στρες χρησιμοποιούνται σαν σημείο αναφοράς στη διάγνωση, στη θεραπεία αλλά και στην πρόγνωση του Parkinson. [87]

Άξια αναφοράς είναι η πειραματική διαδικασία που μελετά τα αποτελέσματα του οξειδωτικού στρες στις μηχανικές ιδιότητες του ερυθροκυττάρου με την χρήση της οπτικής λαβίδας. Αρχικά τα ερυθροκύτταρα υπόκεινται σε οξειδωτικό στρες με την χρήση υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2), σε διαφορετικές συγκεντρώσεις. Κατόπιν διπλή οπτική παγίδα παγιδεύει το ερυθροκύτταρο προκαλώντας του μεταβολές στην μορφολογία του. Στην συνέχεια οι μεταβολές αυτές καταγράφονται και αναλύονται με βάση τις δυνάμεις που έχουν ασκήσει οι δύο παγίδες, και στην συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής διάτμησης της μεμβράνης. [88]



Εικόνα 19: Το ερυθροκύτταρο το οποίο στην άκρη του έχει συνδεδεμένα μικροσφαιρίδια τεντώνεται από τα 2 του άκρα.

4.2.4 Ωσμωτικό περιβάλλον του ερυθροκυττάρου

Το σχήμα του ερυθροκυττάρου πέραν των ασθενειών που έχουν αναφερθεί πιο πάνω μπορεί να αλλοιωθεί και ανάλογα με το ωσμωτικό περιβάλλον το οποίο το περιβάλλει. Εάν το ερυθροκύτταρο βρίσκεται σε ένα υπερτονικό περιβάλλον το ερυθροκύτταρο αποβάλλει νερό από μέσα του με σκοπό να εξισορροπήσει την διαφορά στην συγκέντρωση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ερυθροκύτταρο να συρρικνώνεται και έτσι το σχήμα του να μην θυμίζει σε τίποτα τον αμφίκυκλο δίσκο.

Στην αντίθετη περίπτωση όπου το ερυθροκύτταρο βρίσκεται σε ένα υποτονικό διάλυμα, ξεκινάει να απορροφά νερό από το εξωτερικό του περιβάλλον και να φουσκώνει.



Εικόνα 57: Οι μεταβολές στο σχήμα του ερυθροκυττάρου ανάλογα με το ωσμωτικό περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται.

4.3 Υπολογιστική προσομοίωση ενός ερυθροκυττάρου στο Comsol Mutliphysics

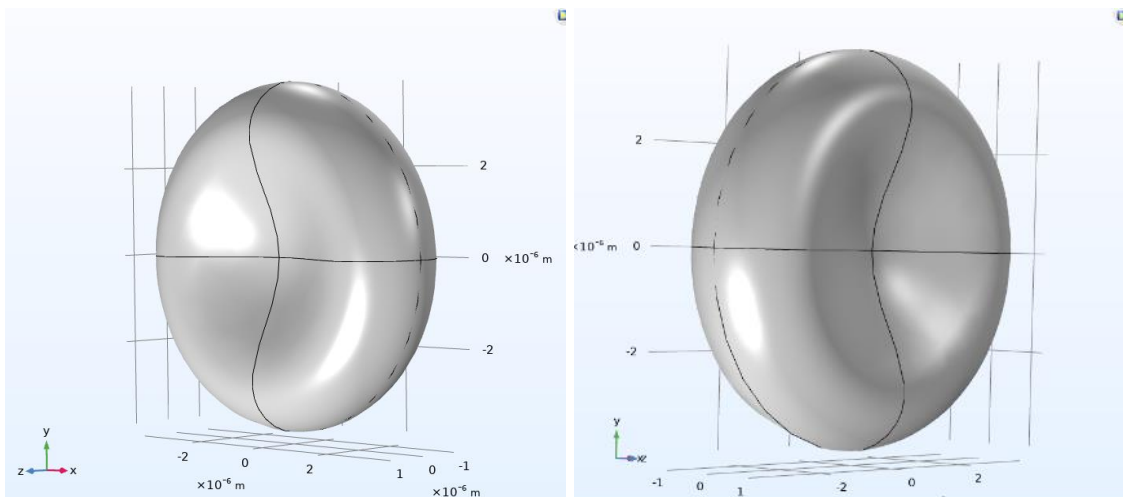
Για την προσομοίωση του ερυθροκυττάρου θα ορίσουμε την γεωμετρία που το διέπει, δηλαδή ενός αμφίκυκλου δίσκου. Καθώς η συγκεκριμένη γεωμετρία δεν είναι ένα κοινό σχήμα το οποίο υπάρχει στην βιβλιοθήκη σχημάτων του COMSOL Multiphysics, χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση που διέπει το συγκεκριμένο σχήμα η οποία είναι η εξής.[78]

$$y = \pm 0.5R_0 \sqrt{1 - \frac{(x^2 + z^2)}{R_0^2}} \left[c_0 + c_1 \frac{(x^2 + z^2)}{R_0^2} + c_2 \frac{(x^2 + z^2)^2}{R_0^4} \right]$$

Όπου $R_0=3.90\mu\text{m}$ και $C_0=0.207161$

$C_1=2.002558$

$C_3=-1.122762$



Εικόνα 58: Το σχήμα του ερυθροκυττάρου που προκύπτει από το Comsol με βάση την πιο πάνω εξίσωση.

Λόγω έλλειψης υπολογιστικής δύναμης, το comsol αδυνατούσε να προσομοιώσει την συγκεκριμένη γεωμετρία στις συγκεκριμένες διαστάσεις. Έτσι στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε μια απλή δισκοειδής γεωμετρία και όχι ο αμφίκυκλος δίσκος. Στο προηγούμενο κεφάλαιο μια από τις υπο μελέτη παραμέτρους ήταν και η ελλειπτικότητα του νανοσωματιδίου. Όσο αυξανόταν η ελλειπτικότητα άλλαζε και το σχήμα της δομής. Με αυτό τον τρόπο γίνεται λοιπόν η σύνδεση με τα ερυθροκύτταρα και το ωσμωτικό τους περιβάλλον. Αυτή η αλλαγή στο σχήμα της δομής που μελετάται, σε περίπτωση που είναι ερυθροκύτταρο θα μπορούσε να οφείλεται σε ένα υπερτονικό ή υποτονικό διάλυμα.

Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που είχαν εξαχθεί πιο πάνω μπορούμε να κάνουμε αναγωγή στο πρόβλημα του κυττάρου. Μια εύλογη απορία θα ήταν πως είναι εφικτή η αναγωγή αυτή αφού το ερυθροκύτταρο έχει πολύ μεγαλύτερη ακτίνα σε σχέση με την δομή που χρησιμοποιήθηκε πιο πάνω. Αυτό βέβαια δεν αποκαλεί πρόβλημα καθώς οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι γραμμικές. Έτσι όταν πολλαπλασιαστούν όλοι οι όροι με την ίδια σταθερά, δεν αλλοιώνεται η ουσία του αποτελέσματος και μπορούμε να εξάγουμε τα σωστά αποτελέσματα.

Δυνατότητες για μελλοντική επέκταση

Κλείνοντας αυτή την διπλωματική εργασία θα ήθελα να αναφέρω τις προοπτικές καθώς και τις μελλοντικές προεκτάσεις που θα μπορούσε να λάβει το συγκεκριμένο θέμα.

Αρχικά όσο αφορά την προσομοίωση, υπάρχουν πολλές παράμετροι που μπορούν να μελετηθούν και να συγκριθούν μεταξύ τους έτσι ώστε κάθε φορά να βρίσκεται ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων ώστε να δημιουργείται η πιο αποδοτική παγίδα κάθε φορά. Οι παράμετροι που θα μπορούσαν να μελετηθούν είναι περισσότερα μήκη κύματος, περισσότερα υλικά για το νανοσωματίδιο, διαφορετικές γεωμετρίες.

Η χρήση του συγκεκριμένου προγράμματος θα μπορούσε να γίνει είτε αυτούσια, είτε συνδυαστικά με ένα πείραμα. Πριν γίνει η πειραματική διάταξη να γνωρίζει για παράδειγμα ο ερευνητής για το συγκεκριμένο υλικό που είναι υπο μελέτη, ποιο μήκος κύματος θα του δίνει μια πιο ισχυρή παγίδα. Άλλη εφαρμογή είναι αυτή του διαχωρισμού κυττάρων. Κάνοντας εκ των προτέρων την προσομοίωση μέσω COMSOL γνωρίζεις με ποια γεωμετρία είναι πιο ισχυρή η παγίδα έτσι σε περίπτωση που πρέπει να διαχωριστούν κύτταρα για παράδειγμα υπάρχει ήδη γνώση ποια είναι αυτά που θα παγιδευτούν και ποια δεν θα τα καταφέρουν.

Με αφορμή την υπολογιστική προσομοίωση των ερυθροκυττάρων μας δίνεται η δυνατότητα για μελλοντική πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων μας. Επίσης θα μπορούσε να προσομοιωθεί μια διπλή παγίδα με δυο δέσμες laser έτσι ώστε να μελετηθεί εις βάθος η παραμόρφωση στην οποία υπόκειται το ερυθροκύτταρο.

Βιβλιογραφία

- [1] J. L. Killian, F. Ye, and M. D. Wang, "Optical Tweezers: A Force to Be Reckoned With," *Cell*, vol. 175, no. 6, pp. 1445–1448, 2018, doi: 10.1016/j.cell.2018.11.019.
- [2] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, and S. Chu, "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles," *Opt. Angular Momentum*, vol. 11, no. 5, pp. 196–198, 2016, doi: 10.1364/ol.11.000288.
- [3] T. A. Nieminen, N. Preez-wilkinson, A. B. Stilgoe, V. L. Y. Loke, A. A. M. Bui, and H. Rubinsztein-dunlop, "Optical tweezers : Theory and modelling," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, no. May 2019, 2014, doi: 10.1016/j.jqsrt.2014.04.003.
- [4] Ε. Σπυράτου, "Φωτο-βιοφυσικές εφαρμογές των laser και ανάπτυξη μεθοδολογίας μικροχειρισμού νανοσωματιδίων με χρήση οπτικής παγίδας laser," 2010.
- [5] A. B. Stilgoe, T. A. Nieminen, G. Kn, N. R. Heckenberg, and H. Rubinsztein-dunlop, "The effect of Mie resonances on trapping in optical tweezers," *Opt. Express*, vol. 16, no. 19, pp. 15039–15051, 2008.
- [6] R. R. Agayan, F. Gittes, R. Kopelman, and C. F. Schmidt, "Optical trapping near resonance absorption," *Appl. Opt.*, vol. 41, no. 12, pp. 2318–2327, Apr. 2002, doi: 10.1364/AO.41.002318.
- [7] N. R. Heckenberg, T. A. Nieminen, G. Kno, and H. Rubinsztein-dunlop, "Physics of Optical Tweezers," vol. 82, no. 06, pp. 207–236, 2007, doi: 10.1016/S0091-679X(06)82006-6.
- [8] Y. Harada and T. Asakura, "Radiation forces on a dielectric sphere in the Rayleigh scattering regime," *Opt. Commun.*, vol. 124, no. 5, pp. 529–541, 1996, doi: [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(95\)00753-9](https://doi.org/10.1016/0030-4018(95)00753-9).
- [9] A. Ashkin, "Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime," *Biophys. J.*, vol. 61, no. 2, pp. 569–582, 1992, doi: [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(92\)81860-X](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(92)81860-X).
- [10] A. J. Cox, A. J. DeWeerd, and J. Linden, "An experiment to measure Mie and Rayleigh total scattering cross sections," *Am. J. Phys.*, vol. 70, no. 6, 2002, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1119/1.1466815>.
- [11] M. S. Lecture 34 Rayleigh Scattering, "<https://Engineering.Purdue.Edu/>," <https://Engineering.Purdue.Edu/>.
- [12] D. L. Andrews, "Multiple optical trapping and binding : new routes to self- assembly," no. May 2014, 2010, doi: 10.1088/0953-4075/43/10/102001.
- [13] D. J. Griffiths, *Εισαγωγή στην ηλεκτροδυναμική*. Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, 2012.
- [14] K. T. Gahagan and G. A. Swartzlander, "Optical vortex trapping of particles," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 11, pp. 827–829, Jun. 1996, doi: 10.1364/OL.21.000827.
- [15] T. A. Nieminen, S. Parkin, T. Asavei, V. L. Y. Loke, N. R. Heckenberg, and H. Rubinsztein-Dunlop, "Chapter 8 - Optical Vortex Trapping and the Dynamics of Particle Rotation," in *Structured Light and Its Applications*, D. L. ANDREWS, Ed. Burlington: Academic Press, 2008, pp. 195–236.
- [16] L. Kolokolova and H. Kimura, "Comet dust as a mixture of aggregates and solid particles: Model consistent with ground-based and space-mission results," *Earth, Planets Sp.*, vol. 62, no. 1, pp. 17–21, 2010, doi: 10.5047/eps.2008.12.001.
- [17] J. C. Brandt, "The Physics of Comet Tails," *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 6, no. 1, pp. 267–286, Sep. 1968, doi: 10.1146/annurev.aa.06.090168.001411.

- [18] P. Lebedev, "Annalen der Physik Annalen der Physik," *Ann. Phys.*, vol. 11, p. 433, 1901.
- [19] J. H. Poynting, "XV. On the transfer of energy in the electromagnetic field," *Philos. Trans. R. Soc. London*, vol. 175, pp. 343–361, 1884, doi: 10.1098/rstl.1884.0016.
- [20] A. Ashkin, "Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 24, no. 4, pp. 156–159, 1970, doi: 10.1103/PhysRevLett.24.156.
- [21] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, and S. Chu, "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles," *Opt. Angular Momentum*, pp. 196–198, 2016, doi: 10.1364/ol.11.000288.
- [22] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, and T. Yamane, "Optical trapping and manipulation of single cells using," *Nature*, vol. 330, pp. 769–711, 1987.
- [23] A. Ashkin and J. M. Dziedzic, "Internal cell manipulation using infrared laser traps.," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 86, no. 20, pp. 7914–7918, 1989, doi: 10.1073/pnas.86.20.7914.
- [24] S. M. Block, D. F. Blair, and H. C. Berg, "Compliance of bacterial polyhooks measured with optical tweezers," *Cytometry*, vol. 12, no. 6, pp. 492–496, 1991, doi: 10.1002/cyto.990120605.
- [25] A. Constable, J. Kim, J. Mervis, F. Zarinetchi, and M. Prentiss, "Demonstration of a fiber-optical light-force trap," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 21, pp. 1867–1869, Nov. 1993, doi: 10.1364/OL.18.001867.
- [26] W. D. Phillips, "Laser cooling and trapping of neutral atoms," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 70, no. 3, pp. 721–741, 1998, doi: 10.1103/revmodphys.70.721.
- [27] W. Ketterle, "When atoms behave as waves: Bose-Einstein condensation and the atom laser," *Int. J. Mod. Phys. B*, vol. 16, no. 30, pp. 4537–4575, 2002, doi: 10.1142/S0217979202014668.
- [28] O. M. Maragò, P. H. Jones, P. G. Gucciardi, G. Volpe, and A. C. Ferrari, "Optical trapping and manipulation of nanostructures," *Nat. Nanotechnol.*, vol. 8, no. 11, pp. 807–819, 2013, doi: 10.1038/nnano.2013.208.
- [29] C. Yi, Q. Zhang, C. W. Li, J. Yang, J. Zhao, and M. Yang, "Optical and electrochemical detection techniques for cell-based microfluidic systems," *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 384, no. 6, pp. 1259–1268, 2006, doi: 10.1007/s00216-005-0252-x.
- [30] H. Löwen, "Colloidal soft matter under external control," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 13, no. 24, 2001, doi: 10.1088/0953-8984/13/24/201.
- [31] D. V. Petrov, "Raman spectroscopy of optically trapped particles," *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, vol. 9, no. 8, 2007, doi: 10.1088/1464-4258/9/8/S06.
- [32] D. J. Müller, J. Helenius, D. Alsteens, and Y. F. Dufrene, "Force probing surfaces of living cells to molecular resolution," *Nat. Chem. Biol.*, vol. 5, no. 6, pp. 383–390, 2009, doi: 10.1038/nchembio.181.
- [33] M. Capitanio and F. S. Pavone, "Interrogating biology with force: Single molecule high-resolution measurements with optical tweezers," *Biophys. J.*, vol. 105, no. 6, pp. 1293–1303, 2013, doi: 10.1016/j.bpj.2013.08.007.
- [34] R. Pool, "Trapping with optical tweezers," *Science (80-.)*, vol. 241, no. 4869, p. 1042, 1988, doi: 10.1126/science.3045966.
- [35] S. M. Block, L. S. B. Goldstein, and B. J. Schnapp, "Bead movement by single kinesin molecules studied with optical tweezers," *Nature*, vol. 348, no. 6299, pp. 348–352, 1990, doi: 10.1038/348348a0.
- [36] R. W. Steubing, S. Cheng, W. H. Wright, Y. Numajiri, and M. W. Berns, "Laser induced cell fusion in combination with optical tweezers: the laser cell fusion trap.," *Cytometry*, vol. 12, no. 6, pp. 505–510, 1991, doi: 10.1002/cyto.990120607.
- [37] M. D. Wang, H. Yin, R. Landick, J. Gelles, and S. M. Block, "Stretching DNA with optical tweezers,"

- Biophys. J.*, vol. 72, no. 3, pp. 1335–1346, 1997, doi: 10.1016/S0006-3495(97)78780-0.
- [38] A. Candelli, G. J. L. Wuite, and E. J. G. Peterman, “Combining optical trapping, fluorescence microscopy and micro-fluidics for single molecule studies of DNA-protein interactions,” *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 13, no. 16, pp. 7263–7272, 2011, doi: 10.1039/c0cp02844d.
- [39] M. J. Lang, P. M. Fordyce, and S. M. Block, “Combined optical trapping and single-molecule fluorescence,” *J. Biol.*, vol. 2, no. 1, 2003, doi: 10.1186/1475-4924-2-6.
- [40] P. Polimeno *et al.*, “Optical tweezers and their applications,” *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 2018, doi: 10.1016/j.jqsrt.2018.07.013.
- [41] D. Gao *et al.*, “Optical manipulation from the microscale to the nanoscale: fundamentals, advances and prospects,” *Light Sci. Appl.*, vol. 6, no. 9, pp. e17039–e17039, 2017, doi: 10.1038/lsa.2017.39.
- [42] K. Dholakia, M. MacDonald, and G. Spalding, “Optical tweezers: the next generation,” *Phys. World*, vol. 15, no. 10, pp. 31–35, Oct. 2002, doi: 10.1088/2058-7058/15/10/37.
- [43] D. G. Grier, “A revolution in optical manipulation,” no. May, 2014, doi: 10.1038/nature01935.
- [44] K. O. Greulich, “Selected applications of laser scissors and tweezers and new applications in heart research,” *Methods Cell Biol.*, vol. 82, pp. 59–80, 2007, doi: 10.1016/S0091-679X(06)82002-9.
- [45] P. L. Johansen, F. Fenaroli, L. Evensen, G. Griffiths, and G. Koster, “Optical micromanipulation of nanoparticles and cells inside living zebrafish,” *Nat. Commun.*, pp. 1–8, 2016, doi: 10.1038/ncomms10974.
- [46] J. A. Spudich, S. E. Rice, R. S. Rock, T. J. Purcell, and H. M. Warrick, “Optical traps to study properties of molecular motors,” *Cold Spring Harb. Protoc.*, vol. 6, no. 11, pp. 1305–1318, 2011, doi: 10.1101/pdb.top066662.
- [47] F. Berger, S. Klumpp, and R. Lipowsky, “Force-Dependent Unbinding Rate of Molecular Motors from Stationary Optical Trap Data,” *Nano Lett.*, vol. 19, no. 4, pp. 2598–2602, 2019, doi: 10.1021/acs.nanolett.9b00417.
- [48] S. E. Rice, T. J. Purcell, and J. A. Spudich, “Building and using optical traps to study properties of molecular motors,” in *Methods in Enzymology*, 2003, pp. 122–133.
- [49] H. M. Nussenzveig, “Cell membrane biophysics with optical tweezers,” *Eur. Biophys. J.*, vol. 47, no. 5, pp. 499–514, 2018, doi: 10.1007/s00249-017-1268-9.
- [50] I. A. Favre-Bulle, A. B. Stilgoe, E. K. Scott, and H. Rubinsztein-Dunlop, “Optical trapping in vivo: Theory, practice, and applications,” *Nanophotonics*, vol. 8, no. 6, pp. 1023–1040, 2019, doi: 10.1515/nanoph-2019-0055.
- [51] F. Guo *et al.*, “Probing cell–cell communication with microfluidic devices,” *Lab Chip*, vol. 13, no. 16, pp. 3152–3162, 2013, doi: 10.1039/C3LC90067C.
- [52] J. R. Moffitt, Y. R. Chemla, S. B. Smith, and C. Bustamante, “Recent advances in optical tweezers,” *Annu. Rev. Biochem.*, vol. 77, no. August, pp. 205–228, 2008, doi: 10.1146/annurev.biochem.77.043007.090225.
- [53] A. Atajanov, A. Zhanov, and S. Yang, “Sorting and manipulation of biological cells and the prospects for using optical forces,” *Micro Nano Syst. Lett.*, vol. 6, no. 1, 2018, doi: 10.1186/s40486-018-0064-3.
- [54] A. Clement-Sengewald, K. Schütze, A. Ashkin, G. A. Palma, G. Kerlen, and G. Brem, “Fertilization of bovine oocytes induced solely with combined laser microbeam and optical tweezers,” *J. Assist. Reprod. Genet.*, vol. 13, no. 3, pp. 259–265, 1996, doi: 10.1007/BF02065947.
- [55] S. Seeger, S. Monajembashi, K. -J Hutter, G. Futterman, J. Wolfrum, and K. O. Greulich, “Application of laser optical tweezers in immunology and molecular genetics,” *Cytometry*, vol. 12, no. 6, pp. 497–504,

- 1991, doi: 10.1002/cyto.990120606.
- [56] D. G. Glass, N. McAlinden, O. R. Millington, and A. J. Wright, "A minimally invasive optical trapping system to understand cellular interactions at onset of an immune response," *PLoS One*, vol. 12, no. 12, pp. 1–13, 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0188581.
- [57] M. Uchida, M. Sato-Maeda, and H. Tashiro, "Micromanipulation: Whole-cell manipulation by optical trapping," *Curr. Biol.*, vol. 5, no. 4, pp. 380–382, 1995, doi: 10.1016/S0960-9822(95)00078-9.
- [58] R. Zhu, T. Avsievich, A. Popov, and I. Meglinski, "Optical Tweezers in Studies of Red Blood Cells," *Cells*, vol. 9, no. 3, 2020, doi: 10.3390/cells9030545.
- [59] P. C. Ashok and K. Dholakia, "Optical trapping for analytical biotechnology," *Curr. Opin. Biotechnol.*, vol. 23, no. 1, pp. 16–21, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2011.11.011>.
- [60] H. Zhang and K. Liu, "Optical tweezers for single cells," no. April, pp. 671–690, 2008, doi: 10.1098/rsif.2008.0052.
- [61] A. Bunea and J. Gl, "Strategies for Optical Trapping in Biological Samples : Aiming at Microrobotic Surgeons," vol. 1800227, pp. 1–17, 2019, doi: 10.1002/lpor.201800227.
- [62] D. Preece *et al.*, "Optical tweezers: wideband microrheology," *J. Opt.*, vol. 13, no. 4, p. 44022, Mar. 2011, doi: 10.1088/2040-8978/13/4/044022.
- [63] M. Tassieri, R. M. L. Evans, R. L. Warren, N. J. Bailey, and J. M. Cooper, "Microrheology with optical tweezers: data analysis," *New J. Phys.*, vol. 14, no. 11, p. 115032, Nov. 2012, doi: 10.1088/1367-2630/14/11/115032.
- [64] R. W. Bowman and M. J. Padgett, "Optical trapping and binding," *Reports Prog. Phys.*, vol. 76, no. 2, p. 26401, Jan. 2013, doi: 10.1088/0034-4885/76/2/026401.
- [65] M. Capitanio and F. S. Pavone, "Interrogating biology with force: single molecule high-resolution measurements with optical tweezers," *Biophys. J.*, vol. 105, no. 6, pp. 1293–1303, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.bpj.2013.08.007.
- [66] K. C. Neuman and A. Nagy, "Single-molecule force spectroscopy: optical tweezers, magnetic tweezers and atomic force microscopy," *Nat. Methods*, vol. 5, no. 6, pp. 491–505, 2008, doi: 10.1038/nmeth.1218.
- [67] F. M. Fazal and S. M. Block, "Optical tweezers study life under tension," *Nat. Photonics*, vol. 5, no. 6, pp. 318–321, 2011, doi: 10.1038/nphoton.2011.100.
- [68] B. Agate, C. T. A. Brown, W. Sibbett, and K. Dholakia, "Femtosecond optical tweezers for in-situ control of two-photon fluorescence," *Opt. Express*, vol. 12, no. 13, pp. 3011–3017, Jun. 2004, doi: 10.1364/OPEX.12.003011.
- [69] G. S. Sokolovskii *et al.*, "Optical trapping with Bessel beams generated from semiconductor lasers," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 572, no. 1, 2014, doi: 10.1088/1742-6596/572/1/012039.
- [70] Γ. Αναστάσιος, "Μελέτη Οπτικής Παγίδευσης Υποβοηθούμενης από Πλασμονικά Πεδία.," 2014.
- [71] J. E. Curtis, B. A. Koss, and D. G. Grier, "Dynamic Holographic Optical Tweezers," vol. 60637, 2002.
- [72] Y. Zhang *et al.*, "Plasmonic tweezers: for nanoscale optical trapping and beyond," *Light Sci. Appl.*, vol. 10, no. 1, 2021, doi: 10.1038/s41377-021-00474-0.
- [73] X. Zhao, N. Zhao, Y. Shi, H. Xin, and B. Li, "Optical fiber tweezers: A versatile tool for optical trapping and manipulation," *Micromachines*, vol. 11, no. 2, 2020, doi: 10.3390/mi11020114.
- [74] R. S. R. Ribeiro, O. Soppera, A. G. Oliva, A. Guerreiro, and P. A. S. Jorge, "New Trends on Optical Fiber Tweezers," *J. Light. Technol.*, vol. 33, no. 16, pp. 3394–3405, 2015, doi: 10.1109/JLT.2015.2448119.

- [75] A. Kumar, "Spectroscopic characterization of optically trapped nanoparticles Aashutosh Kumar To cite this version : HAL Id : tel-03150718 Caractérisation spectroscopique de nanoparticules piégées optiquement Spectroscopic characterization of optically trapped nanopa," 2021.
- [76] B. J. Eggleton, C. Kerbage, P. S. Westbrook, R. S. Windeler, and A. Hale, "Microstructured optical fiber devices," *Opt. Express*, vol. 9, no. 13, pp. 698–713, Dec. 2001, doi: 10.1364/OE.9.000698.
- [77] L. Xu, Y. Li, and B. Li, "Size-dependent trapping and delivery of submicro-spheres using a submicrofibre," *New J. Phys.*, vol. 14, 2012, doi: 10.1088/1367-2630/14/3/033020.
- [78] L. Yu, Y. Sheng, and A. Chiou, "Three-dimensional light-scattering and deformation of individual biconcave human blood cells in optical tweezers," *Opt. Express*, vol. 21, no. 10, p. 12174, 2013, doi: 10.1364/oe.21.012174.
- [79] C. Rockstuhl and H. P. Herzig, "Rigorous diffraction theory applied to the analysis of the optical force on elliptical nano- and micro-cylinders," *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, vol. 6, no. 10, pp. 921–931, 2004, doi: 10.1088/1464-4258/6/10/001.
- [80] R. Zhu, T. Avsievich, and A. Popov, "Optical Tweezers in Studies of Red Blood Cells," pp. 1–27, 2020, doi: 10.3390/cells9030545.
- [81] A. M. Dondorp, P. A. Kager, J. Vreeken, and N. J. White, "Abnormal blood flow and red blood cell deformability in severe malaria," *Parasitol. Today*, vol. 16, no. 6, pp. 228–232, Jun. 2000, doi: 10.1016/s0169-4758(00)01666-5.
- [82] E. A. Evans, "Bending elastic modulus of red blood cell membrane derived from buckling instability in micropipet aspiration tests," *Biophys. J.*, vol. 43, no. 1, pp. 27–30, Jul. 1983, doi: 10.1016/S0006-3495(83)84319-7.
- [83] C. Lockard Conley and R. Schwartz, "Blood," *Encyclopedia Britannica*. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/blood-biochemistry>.
- [84] R. Gupta, K. M. Musallam, A. T. Taher, and S. Rivella, "Ineffective Erythropoiesis: Anemia and Iron Overload," *Hematol. Oncol. Clin. North Am.*, vol. 32, no. 2, pp. 213–221, 2018, doi: 10.1016/j.hoc.2017.11.009.
- [85] A. Pellizzaro *et al.*, "Direct laser trapping for measuring the behavior of transfused erythrocytes in a sickle cell anemia patient," *Biomed. Opt. Express*, vol. 3, no. 9, p. 2190, 2012, doi: 10.1364/boe.3.002190.
- [86] M. M. Brandão *et al.*, "Optical tweezers for measuring red blood cell elasticity: Application to the study of drug response in sickle cell disease," *Eur. J. Haematol.*, vol. 70, no. 4, pp. 207–211, 2003, doi: 10.1034/j.1600-0609.2003.00027.x.
- [87] V. Dias, E. Junn, and M. M. Mouradian, "The role of oxidative stress in Parkinson's disease.," *J. Parkinsons. Dis.*, vol. 3, no. 4, pp. 461–491, 2013, doi: 10.3233/JPD-130230.
- [88] J. Liu, F. Zhang, L. Zhu, D. Chu, and X. Qu, "Mechanical properties of RBCs under oxidative stress measured by optical tweezers," *Opt. Commun.*, vol. 442, no. January, pp. 56–59, 2019, doi: 10.1016/j.optcom.2019.02.060.
- [89] K. Soo Lee *et al.*, "Refractive-index-based optofluidic particle manipulation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 103, no. 7, 2013, doi: 10.1063/1.4817938.

Στα πιο πάνω κεφάλαια έχουν αναφερθεί απλά τα επεξεργασμένα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τα αριθμητικά αποτελέσματα έτσι όπως έχουν εξαχθεί από το Comsol. Ο λόγος είναι ότι ο όγκος των δεδομένων είναι πολύ μεγάλος και θα αποπροσανατόλιζαν τον αναγνώστη από την ουσία των αποτελεσμάτων αν είχαν τοποθετηθεί στο συγκεκριμένο σημείο. Παρόλα αυτά δεν θα μπορούσα να μην συμπεριληφθούν καθόλου στην διπλωματική μου εργασία καθώς αποτελούν ένα αναπόσπαστο κομμάτι της. Έτσι στην συνέχεια θα παρατεθούν όλες οι τιμές αναλυτικά, όπου με βάση αυτές είχε υπολογιστεί η ακαμψία της παγίδας.

Παράρτημα Α για $\lambda=1064$ nm:

- **e=0.1**

a=0.5	e=0.1
z[m]	Fz[N]
-1.23E-07	-1.84E-13
-9.85E-08	-2.70E-13
-7.39E-08	-3.20E-13
-4.93E-08	-3.32E-13
-2.46E-08	-3.16E-13
0	-2.85E-13
2.46E-08	-2.55E-13
4.93E-08	-2.41E-13
7.39E-08	-2.50E-13
9.85E-08	-2.82E-13
1.23E-07	-3.33E-13

a=0.6 e=0.1	
z[m]	Fz [N]
-1.77E-07	3.64E-13
-1.42E-07	2.23E-13
-1.06E-07	1.03E-13
-7.10E-08	9.29E-15
-3.55E-08	-6.16E-14
0	-1.15E-13
3.55E-08	-1.61E-13
7.10E-08	-2.05E-13
1.06E-07	-2.53E-13
1.42E-07	-3.04E-13
1.77E-07	-3.55E-13

a=0.7 e=0.1	
z[m]	Fz [N]
-2.41E-07	7.67E-13
-1.93E-07	5.90E-13
-1.45E-07	4.26E-13
-9.66E-08	2.80E-13
-4.83E-08	1.53E-13
0	4.54E-14
4.83E-08	-4.72E-14
9.66E-08	-1.27E-13
1.45E-07	-1.96E-13
1.93E-07	-2.53E-13
2.41E-07	-2.97E-13

a=0.8 e=0.1	
z[m]	Fz [N]
-3.15E-07	1.09E-12
-2.52E-07	8.79E-13
-1.89E-07	6.74E-13
-1.26E-07	4.83E-13
-6.31E-08	3.12E-13
0	1.62E-13
6.31E-08	3.44E-14
1.26E-07	-7.09E-14
1.89E-07	-1.54E-13
2.52E-07	-2.14E-13
3.15E-07	-2.52E-13

a=0.9 e=0.1	
z[m]	Fz [N]
-3.99E-07	1.37E-12
-3.19E-07	1.12E-12
-2.39E-07	8.67E-13
-1.60E-07	6.32E-13
-7.98E-08	4.18E-13
5.29E-23	2.31E-13
7.98E-08	7.27E-14
1.60E-07	-5.41E-14
2.39E-07	-1.49E-13
3.19E-07	-2.13E-13
3.99E-07	-2.47E-13

a=1.0 e=0.1	
z[m]	Fz [N]
-4.93E-07	8.65E-12
-4.34E-07	7.64E-12
-3.74E-07	6.64E-12
-3.15E-07	5.67E-12
-2.56E-07	4.74E-12
-1.97E-07	3.86E-12
-1.38E-07	3.05E-12
-7.88E-08	2.32E-12
-1.97E-08	1.67E-12
3.94E-08	1.12E-12
9.85E-08	6.50E-13
1.58E-07	2.74E-13
2.17E-07	-1.25E-14
2.76E-07	-2.14E-13
3.35E-07	-3.37E-13
3.94E-07	-3.86E-13
4.53E-07	-3.71E-13

a=1.1 e=0.1	
z[m]	Fz [N]
-5.96E-07	1.82E-12
-4.77E-07	1.47E-12
-3.58E-07	1.13E-12
-2.38E-07	8.11E-13
-1.19E-07	5.17E-13
0	2.61E-13
1.19E-07	5.21E-14
2.38E-07	-1.07E-13
3.58E-07	-2.17E-13
4.77E-07	-2.80E-13
5.96E-07	-3.03E-13

a=1.2 e=0.1	
z[m]	Fz [N]
-7.10E-07	2.00E-12
-5.96E-07	1.69E-12
-4.82E-07	1.38E-12
-3.69E-07	1.08E-12
-2.55E-07	7.93E-13
-1.42E-07	5.30E-13
-2.84E-08	2.98E-13
8.51E-08	1.01E-13
1.99E-07	-5.75E-14
3.12E-07	-1.77E-13
4.26E-07	-2.59E-13
5.39E-07	-3.05E-13
6.53E-07	-3.20E-13

a=1.3 e=0.1	
z[m]	Fz [N]
-8.33E-07	2.18E-12
-6.99E-07	1.83E-12
-5.66E-07	1.48E-12
-4.33E-07	1.14E-12
-3.00E-07	8.23E-13
-1.67E-07	5.32E-13
-3.33E-08	2.78E-13
9.99E-08	6.66E-14
2.33E-07	-9.83E-14
3.66E-07	-2.16E-13
5.00E-07	-2.88E-13
6.33E-07	-3.18E-13
7.66E-07	-3.12E-13

a=1.4 e=0.1	
z[m]	Fz [N]
-9.66E-07	2.35E-12
-8.11E-07	1.96E-12
-6.57E-07	1.57E-12
-5.02E-07	1.20E-12
-3.48E-07	8.45E-13
-1.93E-07	5.27E-13
-3.86E-08	2.54E-13
1.16E-07	3.21E-14
2.70E-07	-1.34E-13
4.25E-07	-2.43E-13
5.79E-07	-2.98E-13
7.34E-07	-3.04E-13
8.88E-07	-2.65E-13

a=1.5	e=0.1
z[m]	Fz [N]
-1.11E-06	2.52E-12
-9.31E-07	2.09E-12
-7.54E-07	1.67E-12
-5.76E-07	1.25E-12
-3.99E-07	8.65E-13
-2.22E-07	5.21E-13
-4.43E-08	2.30E-13
1.33E-07	1.12E-15
3.10E-07	-1.61E-13
4.88E-07	-2.56E-13
6.65E-07	-2.86E-13
8.43E-07	-2.58E-13
1.02E-06	-1.78E-13

- **e=0.3**

A=0.5 e=0.3	
z[m]	Fz [N]
-1.23E-07	-1.58E-12
-1.03E-07	-1.71E-12
-8.38E-08	-1.78E-12
-6.41E-08	-1.80E-12
-4.43E-08	-1.75E-12
-2.46E-08	-1.65E-12
-4.93E-09	-1.51E-12
1.48E-08	-1.35E-12
3.45E-08	-1.19E-12
5.42E-08	-1.03E-12
7.39E-08	-9.00E-13
9.36E-08	-8.00E-13
1.13E-07	-7.35E-13

A=0.6 e=0.3	
z[m]	Fz [N]
-1.77E-07	-4.03E-13
-1.49E-07	-6.01E-13
-1.21E-07	-7.57E-13
-9.22E-08	-8.67E-13
-6.39E-08	-9.29E-13
-3.55E-08	-9.48E-13
-7.10E-09	-9.31E-13
2.13E-08	-8.89E-13
4.97E-08	-8.33E-13
7.80E-08	-7.76E-13
1.06E-07	-7.24E-13
1.35E-07	-6.83E-13
1.63E-07	-6.53E-13

A=0.7 e=0.3	
z[m]	Fz [N]
-2.41E-07	4.27E-13
-2.03E-07	1.87E-13
-1.64E-07	-2.23E-14
-1.26E-07	-1.94E-13
-8.69E-08	-3.24E-13
-4.83E-08	-4.14E-13
-9.66E-09	-4.67E-13
2.90E-08	-4.90E-13
6.76E-08	-4.89E-13
1.06E-07	-4.70E-13
1.45E-07	-4.40E-13
1.83E-07	-3.99E-13
2.22E-07	-3.48E-13

A=0.8 e=0.3	
z[m]	Fz [N]
-3.15E-07	1.03E-12
-2.65E-07	7.53E-13
-2.14E-07	5.01E-13
-1.64E-07	2.82E-13
-1.14E-07	1.02E-13
-6.31E-08	-3.70E-14
-1.26E-08	-1.35E-13
3.78E-08	-1.94E-13
8.83E-08	-2.18E-13
1.39E-07	-2.11E-13
1.89E-07	-1.76E-13
2.40E-07	-1.16E-13
2.90E-07	-3.22E-14

A=0.9 e=0.3	
z[m]	Fz [N]
-3.99E-07	1.49E-12
-3.35E-07	1.18E-12
-2.71E-07	8.79E-13
-2.08E-07	6.15E-13
-1.44E-07	3.90E-13
-7.98E-08	2.11E-13
-1.60E-08	8.01E-14
4.79E-08	-2.88E-15
1.12E-07	-3.95E-14
1.76E-07	-3.28E-14
2.39E-07	1.39E-14
3.03E-07	9.69E-14
3.67E-07	2.12E-13

A=1.0 e=0.3	
z[m]	Fz [N]
-4.93E-07	1.86E-12
-4.34E-07	1.59E-12
-3.74E-07	1.32E-12
-3.15E-07	1.07E-12
-2.56E-07	8.43E-13
-1.97E-07	6.38E-13
-1.38E-07	4.61E-13
-7.88E-08	3.15E-13
-1.97E-08	2.02E-13
3.94E-08	1.22E-13
9.85E-08	7.44E-14
1.58E-07	5.92E-14
2.17E-07	7.45E-14
2.76E-07	1.19E-13
3.35E-07	1.89E-13
3.94E-07	2.82E-13
4.53E-07	3.97E-13

A=1.1 e=0.3	
z[m]	Fz [N]
-5.96E-07	2.17E-12
-5.01E-07	1.75E-12
-4.05E-07	1.36E-12
-3.10E-07	9.97E-13
-2.15E-07	6.88E-13
-1.19E-07	4.39E-13
-2.38E-08	2.58E-13
7.15E-08	1.48E-13
1.67E-07	1.09E-13
2.62E-07	1.37E-13
3.58E-07	2.28E-13
4.53E-07	3.71E-13
5.49E-07	5.59E-13

A=1.2 e=0.3	
z[m]	Fz [N]
-7.10E-07	2.44E-12
-5.96E-07	1.97E-12
-4.82E-07	1.52E-12
-3.69E-07	1.11E-12
-2.55E-07	7.54E-13
-1.42E-07	4.72E-13
-2.84E-08	2.72E-13
8.51E-08	1.56E-13
1.99E-07	1.27E-13
3.12E-07	1.80E-13
4.26E-07	3.06E-13
5.39E-07	4.95E-13
6.53E-07	7.34E-13

A=1.3 e=0.3	
z[m]	Fz [N]
-8.33E-07	2.71E-12
-6.99E-07	2.17E-12
-5.66E-07	1.65E-12
-4.33E-07	1.19E-12
-3.00E-07	7.92E-13
-1.67E-07	4.78E-13
-3.33E-08	2.61E-13
9.99E-08	1.46E-13
2.33E-07	1.35E-13
3.66E-07	2.22E-13
5.00E-07	3.96E-13
6.33E-07	6.42E-13
7.66E-07	9.46E-13

A=1.4 e=0.3	
z[m]	Fz [N]
-9.66E-07	2.99E-12
-8.50E-07	2.53E-12
-7.34E-07	2.08E-12
-6.18E-07	1.65E-12
-5.02E-07	1.26E-12
-3.86E-07	9.20E-13
-2.70E-07	6.30E-13
-1.55E-07	4.01E-13
-3.86E-08	2.39E-13
7.73E-08	1.45E-13
1.93E-07	1.22E-13
3.09E-07	1.66E-13
4.25E-07	2.74E-13
5.41E-07	4.40E-13
6.57E-07	6.57E-13
7.73E-07	9.15E-13
8.88E-07	1.21E-12

A=1.5 e=0.3	
z[m]	Fz [N]
-1.11E-06	3.29E-12
-9.76E-07	2.77E-12
-8.43E-07	2.26E-12
-7.10E-07	1.78E-12
-5.76E-07	1.34E-12
-4.43E-07	9.54E-13
-3.10E-07	6.33E-13
-1.77E-07	3.83E-13
-4.43E-08	2.12E-13
8.87E-08	1.24E-13
2.22E-07	1.18E-13
3.55E-07	1.93E-13
4.88E-07	3.42E-13
6.21E-07	5.60E-13
7.54E-07	8.36E-13
8.87E-07	1.16E-12
1.02E-06	1.52E-12

- **e=0.5**

A=0.5 e=0.5	
z[m]	Fz [N]
-1.23E-07	-1.75E-12
-1.08E-07	-1.82E-12
-9.36E-08	-1.87E-12
-7.88E-08	-1.91E-12
-6.41E-08	-1.94E-12
-4.93E-08	-1.96E-12
-3.45E-08	-1.96E-12
-1.97E-08	-1.96E-12
-4.93E-09	-1.96E-12
9.85E-09	-1.94E-12
2.46E-08	-1.93E-12
3.94E-08	-1.91E-12
5.42E-08	-1.88E-12
6.90E-08	-1.86E-12
8.38E-08	-1.84E-12
9.85E-08	-1.81E-12
1.13E-07	-1.80E-12

A=0.6 e=0.5	
z[m]	Fz [N]
-1.77E-07	-4.58E-13
-1.56E-07	-6.25E-13
-1.35E-07	-7.71E-13
-1.14E-07	-8.97E-13
-9.22E-08	-1.00E-12
-7.10E-08	-1.09E-12
-4.97E-08	-1.17E-12
-2.84E-08	-1.23E-12
-7.10E-09	-1.28E-12
1.42E-08	-1.32E-12
3.55E-08	-1.36E-12
5.68E-08	-1.40E-12
7.80E-08	-1.44E-12
9.93E-08	-1.48E-12
1.21E-07	-1.52E-12
1.42E-07	-1.57E-12
1.63E-07	-1.63E-12

A=0.7 e=0.5	
z[m]	Fz [N]
-2.41E-07	5.95E-13
-2.12E-07	3.86E-13
-1.83E-07	1.89E-13
-1.55E-07	5.85E-15
-1.26E-07	-1.63E-13
-9.66E-08	-3.16E-13
-6.76E-08	-4.56E-13
-3.86E-08	-5.83E-13
-9.66E-09	-7.00E-13
1.93E-08	-8.09E-13
4.83E-08	-9.13E-13
7.73E-08	-1.01E-12
1.06E-07	-1.11E-12
1.35E-07	-1.21E-12
1.64E-07	-1.32E-12
1.93E-07	-1.42E-12
2.22E-07	-1.53E-12

A=0.8 e=0.5	
z[m]	Fz [N]
-3.15E-07	1.27E-12
-2.78E-07	1.06E-12
-2.40E-07	8.51E-13
-2.02E-07	6.44E-13
-1.64E-07	4.43E-13
-1.26E-07	2.49E-13
-8.83E-08	6.42E-14
-5.05E-08	-1.13E-13
-1.26E-08	-2.82E-13
2.52E-08	-4.45E-13
6.31E-08	-6.02E-13
1.01E-07	-7.56E-13
1.39E-07	-9.06E-13
1.77E-07	-1.05E-12
2.14E-07	-1.20E-12
2.52E-07	-1.34E-12
2.90E-07	-1.47E-12

A=0.9 e=1.5	
z[m]	Fz [N]
-3.99E-07	1.66E-12
-3.51E-07	1.46E-12
-3.03E-07	1.26E-12
-2.55E-07	1.05E-12
-2.08E-07	8.31E-13
-1.60E-07	6.16E-13
-1.12E-07	4.04E-13
-6.39E-08	1.94E-13
-1.60E-08	-1.19E-14
3.19E-08	-2.13E-13
7.98E-08	-4.10E-13
1.28E-07	-6.02E-13
1.76E-07	-7.89E-13
2.24E-07	-9.70E-13
2.71E-07	-1.14E-12
3.19E-07	-1.31E-12
3.67E-07	-1.46E-12

a=1.0 e=0.5	
z[m]	Fz [N]
-4.93E-07	1.85E-12
-4.34E-07	1.67E-12
-3.74E-07	1.48E-12
-3.15E-07	1.27E-12
-2.56E-07	1.05E-12
-1.97E-07	8.32E-13
-1.38E-07	6.05E-13
-7.88E-08	3.76E-13
-1.97E-08	1.48E-13
3.94E-08	-7.78E-14
9.85E-08	-3.00E-13
1.58E-07	-5.18E-13
2.17E-07	-7.29E-13
2.76E-07	-9.31E-13
3.35E-07	-1.12E-12
3.94E-07	-1.30E-12
4.53E-07	-1.47E-12

a=1.1e=0.5	
z[m]	Fz [N]
-5.96E-07	1.91E-12
-5.25E-07	1.75E-12
-4.53E-07	1.57E-12
-3.82E-07	1.37E-12
-3.10E-07	1.16E-12
-2.38E-07	9.41E-13
-1.67E-07	7.11E-13
-9.54E-08	4.75E-13
-2.38E-08	2.36E-13
4.77E-08	-3.47E-15
1.19E-07	-2.40E-13
1.91E-07	-4.71E-13
2.62E-07	-6.94E-13
3.34E-07	-9.07E-13
4.05E-07	-1.11E-12
4.77E-07	-1.29E-12
5.49E-07	-1.46E-12

a=1.2 e=0.5	
z[m]	Fz [N]
-7.10E-07	1.88E-12
-6.24E-07	1.74E-12
-5.39E-07	1.58E-12
-4.54E-07	1.40E-12
-3.69E-07	1.20E-12
-2.84E-07	9.82E-13
-1.99E-07	7.55E-13
-1.14E-07	5.19E-13
-2.84E-08	2.78E-13
5.68E-08	3.49E-14
1.42E-07	-2.06E-13
2.27E-07	-4.42E-13
3.12E-07	-6.69E-13
3.97E-07	-8.85E-13
4.82E-07	-1.09E-12
5.68E-07	-1.27E-12
6.53E-07	-1.43E-12

a=1.3 e=0.5	
z[m]	Fz [N]
-8.33E-07	1.82E-12
-7.33E-07	1.69E-12
-6.33E-07	1.55E-12
-5.33E-07	1.38E-12
-4.33E-07	1.19E-12
-3.33E-07	9.82E-13
-2.33E-07	7.61E-13
-1.33E-07	5.31E-13
-3.33E-08	2.93E-13
6.66E-08	5.31E-14
1.67E-07	-1.86E-13
2.66E-07	-4.20E-13
3.66E-07	-6.45E-13
4.66E-07	-8.58E-13
5.66E-07	-1.06E-12
6.66E-07	-1.23E-12
7.66E-07	-1.39E-12

a=1.4 e=0.5	
z[m]	Fz [N]
-9.66E-07	1.74E-12
-8.50E-07	1.63E-12
-7.34E-07	1.49E-12
-6.18E-07	1.33E-12
-5.02E-07	1.15E-12
-3.86E-07	9.58E-13
-2.70E-07	7.47E-13
-1.55E-07	5.25E-13
-3.86E-08	2.94E-13
7.73E-08	6.03E-14
1.93E-07	-1.73E-13
3.09E-07	-4.02E-13
4.25E-07	-6.21E-13
5.41E-07	-8.28E-13
6.57E-07	-1.02E-12
7.73E-07	-1.19E-12
8.88E-07	-1.34E-12

a=1.5 e=0.5	
z[m]	Fz [N]
-1.11E-06	1.66E-12
-9.76E-07	1.55E-12
-8.43E-07	1.43E-12
-7.10E-07	1.28E-12
-5.76E-07	1.11E-12
-4.43E-07	9.24E-13
-3.10E-07	7.22E-13
-1.77E-07	5.09E-13
-4.43E-08	2.87E-13
8.87E-08	6.17E-14
2.22E-07	-1.64E-13
3.55E-07	-3.85E-13
4.88E-07	-5.97E-13
6.21E-07	-7.97E-13
7.54E-07	-9.81E-13
8.87E-07	-1.15E-12
1.02E-06	-1.30E-12

- **e=0.7**

a=0.5 e=0.7	
z[m]	Fz [N]
-1.23E-07	-2.17E-12
-1.08E-07	-2.27E-12
-9.36E-08	-2.35E-12
-7.88E-08	-2.42E-12
-6.41E-08	-2.47E-12
-4.93E-08	-2.52E-12
-3.45E-08	-2.56E-12
-1.97E-08	-2.59E-12
-4.93E-09	-2.61E-12
9.85E-09	-2.62E-12
2.46E-08	-2.62E-12
3.94E-08	-2.62E-12
5.42E-08	-2.62E-12
6.90E-08	-2.60E-12
8.38E-08	-2.58E-12
9.85E-08	-2.56E-12
1.13E-07	-2.54E-12

a=0.6 e=0.7	
z[m]	Fz [N]
-1.77E-07	-5.34E-13
-1.56E-07	-7.46E-13
-1.35E-07	-9.35E-13
-1.14E-07	-1.10E-12
-9.22E-08	-1.24E-12
-7.10E-08	-1.37E-12
-4.97E-08	-1.47E-12
-2.84E-08	-1.56E-12
-7.10E-09	-1.63E-12
1.42E-08	-1.69E-12
3.55E-08	-1.74E-12
5.68E-08	-1.78E-12
7.80E-08	-1.81E-12
9.93E-08	-1.83E-12
1.21E-07	-1.85E-12
1.42E-07	-1.87E-12
1.63E-07	-1.89E-12

a=0.7 e=0.7	
z[m]	Fz [N]
-2.41E-07	1.01E-12
-2.12E-07	7.02E-13
-1.83E-07	4.19E-13
-1.55E-07	1.60E-13
-1.26E-07	-7.51E-14
-9.66E-08	-2.87E-13
-6.76E-08	-4.75E-13
-3.86E-08	-6.43E-13
-9.66E-09	-7.91E-13
1.93E-08	-9.23E-13
4.83E-08	-1.04E-12
7.73E-08	-1.15E-12
1.06E-07	-1.24E-12
1.35E-07	-1.34E-12
1.64E-07	-1.42E-12
1.93E-07	-1.51E-12
2.22E-07	-1.60E-12

a=0.8 e=0.7	
z[m]	Fz [N]
-3.15E-07	2.11E-12
-2.78E-07	1.77E-12
-2.40E-07	1.43E-12
-2.02E-07	1.11E-12
-1.64E-07	8.10E-13
-1.26E-07	5.26E-13
-8.83E-08	2.62E-13
-5.05E-08	1.87E-14
-1.26E-08	-2.05E-13
2.52E-08	-4.10E-13
6.31E-08	-5.99E-13
1.01E-07	-7.75E-13
1.39E-07	-9.39E-13
1.77E-07	-1.09E-12
2.14E-07	-1.24E-12
2.52E-07	-1.38E-12
2.90E-07	-1.51E-12

a=0.9 e=0.7	
z[m]	Fz [N]
-3.99E-07	2.81E-12
-3.51E-07	2.46E-12
-3.03E-07	2.10E-12
-2.55E-07	1.74E-12
-2.08E-07	1.40E-12
-1.60E-07	1.06E-12
-1.12E-07	7.43E-13
-6.39E-08	4.42E-13
-1.60E-08	1.60E-13
3.19E-08	-1.03E-13
7.98E-08	-3.47E-13
1.28E-07	-5.72E-13
1.76E-07	-7.81E-13
2.24E-07	-9.72E-13
2.71E-07	-1.15E-12
3.19E-07	-1.30E-12
3.67E-07	-1.44E-12

a=1.0	e=0.7
z[m]	Fz [N]
-4.93E-07	3.22E-12
-4.34E-07	2.86E-12
-3.74E-07	2.49E-12
-3.15E-07	2.12E-12
-2.56E-07	1.75E-12
-1.97E-07	1.38E-12
-1.38E-07	1.03E-12
-7.88E-08	6.86E-13
-1.97E-08	3.66E-13
3.94E-08	6.74E-14
9.85E-08	-2.08E-13
1.58E-07	-4.60E-13
2.17E-07	-6.88E-13
2.76E-07	-8.89E-13
3.35E-07	-1.07E-12
3.94E-07	-1.21E-12
4.53E-07	-1.33E-12

a=1.1 e=0.7	
z[m]	Fz [N]
-5.96E-07	3.44E-12
-5.25E-07	3.08E-12
-4.53E-07	2.71E-12
-3.82E-07	2.32E-12
-3.10E-07	1.93E-12
-2.38E-07	1.55E-12
-1.67E-07	1.17E-12
-9.54E-08	8.11E-13
-2.38E-08	4.71E-13
4.77E-08	1.55E-13
1.19E-07	-1.32E-13
1.91E-07	-3.89E-13
2.62E-07	-6.14E-13
3.34E-07	-8.04E-13
4.05E-07	-9.60E-13
4.77E-07	-1.08E-12
5.49E-07	-1.16E-12

a=1.2 e=0.7	
z[m]	Fz [N]
-7.10E-07	3.56E-12
-6.24E-07	3.20E-12
-5.39E-07	2.82E-12
-4.54E-07	2.42E-12
-3.69E-07	2.02E-12
-2.84E-07	1.62E-12
-1.99E-07	1.23E-12
-1.14E-07	8.61E-13
-2.84E-08	5.14E-13
5.68E-08	1.97E-13
1.42E-07	-8.70E-14
2.27E-07	-3.33E-13
3.12E-07	-5.39E-13
3.97E-07	-7.03E-13
4.82E-07	-8.25E-13
5.68E-07	-9.05E-13
6.53E-07	-9.43E-13

a=1.3 e=0.7	
z[m]	Fz [N]
-8.33E-07	3.64E-12
-7.33E-07	3.26E-12
-6.33E-07	2.87E-12
-5.33E-07	2.46E-12
-4.33E-07	2.05E-12
-3.33E-07	1.64E-12
-2.33E-07	1.24E-12
-1.33E-07	8.69E-13
-3.33E-08	5.24E-13
6.66E-08	2.13E-13
1.67E-07	-5.61E-14
2.66E-07	-2.81E-13
3.66E-07	-4.58E-13
4.66E-07	-5.87E-13
5.66E-07	-6.68E-13
6.66E-07	-7.01E-13
7.66E-07	-6.91E-13

a=1.4 e=0.7	
z[m]	Fz [N]
-9.66E-07	3.70E-12
-8.50E-07	3.31E-12
-7.34E-07	2.90E-12
-6.18E-07	2.47E-12
-5.02E-07	2.05E-12
-3.86E-07	1.63E-12
-2.70E-07	1.23E-12
-1.55E-07	8.55E-13
-3.86E-08	5.15E-13
7.73E-08	2.17E-13
1.93E-07	-3.21E-14
3.09E-07	-2.30E-13
4.25E-07	-3.73E-13
5.41E-07	-4.62E-13
6.57E-07	-4.99E-13
7.73E-07	-4.86E-13
8.88E-07	-4.27E-13

a=1.5 e=0.7	
z[m]	Fz [N]
-1.11E-06	3.79E-12
-9.76E-07	3.37E-12
-8.43E-07	2.93E-12
-7.10E-07	2.48E-12
-5.76E-07	2.04E-12
-4.43E-07	1.61E-12
-3.10E-07	1.20E-12
-1.77E-07	8.29E-13
-4.43E-08	4.97E-13
8.87E-08	2.14E-13
2.22E-07	-1.19E-14
3.55E-07	-1.79E-13
4.88E-07	-2.86E-13
6.21E-07	-3.35E-13
7.54E-07	-3.27E-13
8.87E-07	-2.69E-13
1.02E-06	-1.67E-13

- **e=0.9**

a=0.5 e=0.9	
z[m]	Fz [N]
-1.23E-07	-2.78E-12
-1.08E-07	-2.84E-12
-9.36E-08	-2.89E-12
-7.88E-08	-2.94E-12
-6.41E-08	-2.98E-12
-4.93E-08	-3.01E-12
-3.45E-08	-3.04E-12
-1.97E-08	-3.06E-12
-4.93E-09	-3.08E-12
9.85E-09	-3.09E-12
2.46E-08	-3.09E-12
3.94E-08	-3.09E-12
5.42E-08	-3.08E-12
6.90E-08	-3.07E-12
8.38E-08	-3.06E-12
9.85E-08	-3.03E-12
1.13E-07	-3.01E-12

a=0.6 e=0.9	
z[m]	Fz [N]
-1.77E-07	-1.34E-12
-1.56E-07	-1.49E-12
-1.35E-07	-1.62E-12
-1.14E-07	-1.73E-12
-9.22E-08	-1.83E-12
-7.10E-08	-1.91E-12
-4.97E-08	-1.97E-12
-2.84E-08	-2.02E-12
-7.10E-09	-2.07E-12
1.42E-08	-2.10E-12
3.55E-08	-2.12E-12
5.68E-08	-2.13E-12
7.80E-08	-2.14E-12
9.93E-08	-2.14E-12
1.21E-07	-2.14E-12
1.42E-07	-2.14E-12
1.63E-07	-2.13E-12

a=0.7 e=0.9	
z[m]	Fz [N]
-2.41E-07	1.78E-13
-2.12E-07	-5.73E-14
-1.83E-07	-2.71E-13
-1.55E-07	-4.62E-13
-1.26E-07	-6.32E-13
-9.66E-08	-7.83E-13
-6.76E-08	-9.15E-13
-3.86E-08	-1.03E-12
-9.66E-09	-1.13E-12
1.93E-08	-1.22E-12
4.83E-08	-1.30E-12
7.73E-08	-1.38E-12
1.06E-07	-1.45E-12
1.35E-07	-1.52E-12
1.64E-07	-1.59E-12
1.93E-07	-1.66E-12
2.22E-07	-1.74E-12

a=0.8 e=0.9	
z[m]	Fz [N]
-3.15E-07	1.36E-12
-2.78E-07	1.08E-12
-2.40E-07	8.16E-13
-2.02E-07	5.65E-13
-1.64E-07	3.31E-13
-1.26E-07	1.13E-13
-8.83E-08	-8.83E-14
-5.05E-08	-2.75E-13
-1.26E-08	-4.49E-13
2.52E-08	-6.12E-13
6.31E-08	-7.67E-13
1.01E-07	-9.17E-13
1.39E-07	-1.06E-12
1.77E-07	-1.21E-12
2.14E-07	-1.36E-12
2.52E-07	-1.51E-12
2.90E-07	-1.66E-12

a=0.9 e=0.9	
z[m]	Fz [N]
-3.99E-07	2.09E-12
-3.51E-07	1.82E-12
-3.03E-07	1.54E-12
-2.55E-07	1.26E-12
-2.08E-07	9.91E-13
-1.60E-07	7.27E-13
-1.12E-07	4.74E-13
-6.39E-08	2.30E-13
-1.60E-08	-4.88E-15
3.19E-08	-2.31E-13
7.98E-08	-4.50E-13
1.28E-07	-6.63E-13
1.76E-07	-8.71E-13
2.24E-07	-1.07E-12
2.71E-07	-1.27E-12
3.19E-07	-1.47E-12
3.67E-07	-1.65E-12

a=1.0 e=0.9	
z[m]	Fz [N]
-4.93E-07	2.46E-12
-4.34E-07	2.21E-12
-3.74E-07	1.94E-12
-3.15E-07	1.66E-12
-2.56E-07	1.38E-12
-1.97E-07	1.09E-12
-1.38E-07	8.11E-13
-7.88E-08	5.30E-13
-1.97E-08	2.55E-13
3.94E-08	-1.36E-14
9.85E-08	-2.76E-13
1.58E-07	-5.30E-13
2.17E-07	-7.77E-13
2.76E-07	-1.01E-12
3.35E-07	-1.24E-12
3.94E-07	-1.45E-12
4.53E-07	-1.65E-12

a=1.1 e=0.9	
z[m]	Fz [N]
-5.96E-07	2.57E-12
-5.25E-07	2.35E-12
-4.53E-07	2.11E-12
-3.82E-07	1.84E-12
-3.10E-07	1.57E-12
-2.38E-07	1.28E-12
-1.67E-07	9.82E-13
-9.54E-08	6.85E-13
-2.38E-08	3.89E-13
4.77E-08	9.73E-14
1.19E-07	-1.88E-13
1.91E-07	-4.65E-13
2.62E-07	-7.31E-13
3.34E-07	-9.83E-13
4.05E-07	-1.22E-12
4.77E-07	-1.44E-12
5.49E-07	-1.63E-12

a=1.2 e=0.9	
z[m]	Fz [N]
-7.10E-07	2.53E-12
-6.24E-07	2.34E-12
-5.39E-07	2.13E-12
-4.54E-07	1.88E-12
-3.69E-07	1.62E-12
-2.84E-07	1.34E-12
-1.99E-07	1.04E-12
-1.14E-07	7.45E-13
-2.84E-08	4.44E-13
5.68E-08	1.44E-13
1.42E-07	-1.49E-13
2.27E-07	-4.33E-13
3.12E-07	-7.04E-13
3.97E-07	-9.58E-13
4.82E-07	-1.19E-12
5.68E-07	-1.41E-12
6.53E-07	-1.60E-12

a=1.3 e=0.9	
z[m]	Fz [N]
-8.33E-07	2.42E-12
-7.33E-07	2.25E-12
-6.33E-07	2.06E-12
-5.33E-07	1.84E-12
-4.33E-07	1.59E-12
-3.33E-07	1.32E-12
-2.33E-07	1.04E-12
-1.33E-07	7.49E-13
-3.33E-08	4.52E-13
6.66E-08	1.57E-13
1.67E-07	-1.34E-13
2.66E-07	-4.14E-13
3.66E-07	-6.80E-13
4.66E-07	-9.28E-13
5.66E-07	-1.16E-12
6.66E-07	-1.36E-12
7.66E-07	-1.54E-12

a=1.4 e=0.9	
z[m]	Fz [N]
-9.66E-07	2.27E-12
-8.50E-07	2.13E-12
-7.34E-07	1.95E-12
-6.18E-07	1.75E-12
-5.02E-07	1.52E-12
-3.86E-07	1.27E-12
-2.70E-07	1.00E-12
-1.55E-07	7.22E-13
-3.86E-08	4.37E-13
7.73E-08	1.52E-13
1.93E-07	-1.28E-13
3.09E-07	-3.97E-13
4.25E-07	-6.52E-13
5.41E-07	-8.89E-13
6.57E-07	-1.10E-12
7.73E-07	-1.30E-12
8.88E-07	-1.47E-12

a=1.5 e=0.9	
z[m]	Fz [N]
-1.11E-06	2.12E-12
-9.76E-07	1.99E-12
-8.43E-07	1.83E-12
-7.10E-07	1.64E-12
-5.76E-07	1.43E-12
-4.43E-07	1.19E-12
-3.10E-07	9.43E-13
-1.77E-07	6.80E-13
-4.43E-08	4.11E-13
8.87E-08	1.41E-13
2.22E-07	-1.24E-13
3.55E-07	-3.79E-13
4.88E-07	-6.20E-13
6.21E-07	-8.43E-13
7.54E-07	-1.05E-12
8.87E-07	-1.23E-12
1.02E-06	-1.39E-12

- e=1.0**

a=0.5 e=1.0	
z[m]	Fz [N]
-1.23E-07	-2.49E-12
-1.08E-07	-2.54E-12
-9.36E-08	-2.57E-12
-7.88E-08	-2.60E-12
-6.41E-08	-2.62E-12
-4.93E-08	-2.64E-12
-3.45E-08	-2.65E-12
-1.97E-08	-2.66E-12
-4.93E-09	-2.66E-12
9.85E-09	-2.66E-12
2.46E-08	-2.65E-12
3.94E-08	-2.64E-12
5.42E-08	-2.63E-12
6.90E-08	-2.61E-12
8.38E-08	-2.59E-12
9.85E-08	-2.57E-12
1.13E-07	-2.55E-12

a=0.6 e=1.0	
z[m]	Fz [N]
-1.77E-07	-9.91E-13
-1.56E-07	-1.12E-12
-1.35E-07	-1.23E-12
-1.14E-07	-1.32E-12
-9.22E-08	-1.40E-12
-7.10E-08	-1.47E-12
-4.97E-08	-1.52E-12
-2.84E-08	-1.57E-12
-7.10E-09	-1.60E-12
1.42E-08	-1.63E-12
3.55E-08	-1.65E-12
5.68E-08	-1.66E-12
7.80E-08	-1.68E-12
9.93E-08	-1.68E-12
1.21E-07	-1.69E-12
1.42E-07	-1.70E-12
1.63E-07	-1.71E-12

a=0.7 e=1.0	
z[m]	Fz [N]
-2.41E-07	6.04E-13
-2.12E-07	3.83E-13
-1.83E-07	1.83E-13
-1.55E-07	3.50E-15
-1.26E-07	-1.58E-13
-9.66E-08	-3.01E-13
-6.76E-08	-4.30E-13
-3.86E-08	-5.45E-13
-9.66E-09	-6.50E-13
1.93E-08	-7.46E-13
4.83E-08	-8.36E-13
7.73E-08	-9.24E-13
1.06E-07	-1.01E-12
1.35E-07	-1.10E-12
1.64E-07	-1.19E-12
1.93E-07	-1.29E-12
2.22E-07	-1.40E-12

a=0.8 e=1.0	
z[m]	Fz [N]
-3.15E-07	1.88E-12
-2.78E-07	1.61E-12
-2.40E-07	1.34E-12
-2.02E-07	1.09E-12
-1.64E-07	8.55E-13
-1.26E-07	6.33E-13
-8.83E-08	4.23E-13
-5.05E-08	2.25E-13
-1.26E-08	3.63E-14
2.52E-08	-1.46E-13
6.31E-08	-3.24E-13
1.01E-07	-5.01E-13
1.39E-07	-6.78E-13
1.77E-07	-8.59E-13
2.14E-07	-1.04E-12
2.52E-07	-1.23E-12
2.90E-07	-1.43E-12

a=0.9 e=1.0	
z[m]	Fz [N]
-3.99E-07	2.71E-12
-3.51E-07	2.42E-12
-3.03E-07	2.13E-12
-2.55E-07	1.85E-12
-2.08E-07	1.56E-12
-1.60E-07	1.28E-12
-1.12E-07	1.00E-12
-6.39E-08	7.36E-13
-1.60E-08	4.73E-13
3.19E-08	2.13E-13
7.98E-08	-4.29E-14
1.28E-07	-2.97E-13
1.76E-07	-5.51E-13
2.24E-07	-8.04E-13
2.71E-07	-1.05E-12
3.19E-07	-1.30E-12
3.67E-07	-1.54E-12

a=1.0 e=1.0	
z[m]	Fz [N]
-4.93E-07	3.13E-12
-4.34E-07	2.86E-12
-3.74E-07	2.58E-12
-3.15E-07	2.28E-12
-2.56E-07	1.98E-12
-1.97E-07	1.67E-12
-1.38E-07	1.35E-12
-7.88E-08	1.03E-12
-1.97E-08	7.16E-13
3.94E-08	4.00E-13
9.85E-08	8.63E-14
1.58E-07	-2.25E-13
2.17E-07	-5.32E-13
2.76E-07	-8.32E-13
3.35E-07	-1.12E-12
3.94E-07	-1.41E-12
4.53E-07	-1.67E-12

a=1.1 e=1.0	
z[m]	Fz [N]
-5.96E-07	3.26E-12
-5.25E-07	3.03E-12
-4.53E-07	2.77E-12
-3.82E-07	2.48E-12
-3.10E-07	2.18E-12
-2.38E-07	1.85E-12
-1.67E-07	1.52E-12
-9.54E-08	1.17E-12
-2.38E-08	8.24E-13
4.77E-08	4.73E-13
1.19E-07	1.22E-13
1.91E-07	-2.25E-13
2.62E-07	-5.65E-13
3.34E-07	-8.96E-13
4.05E-07	-1.21E-12
4.77E-07	-1.51E-12
5.49E-07	-1.79E-12

a=1.2 e=1.0	
z[m]	Fz [N]
-7.10E-07	3.22E-12
-6.24E-07	3.02E-12
-5.39E-07	2.79E-12
-4.54E-07	2.52E-12
-3.69E-07	2.22E-12
-2.84E-07	1.90E-12
-1.99E-07	1.56E-12
-1.14E-07	1.21E-12
-2.84E-08	8.46E-13
5.68E-08	4.77E-13
1.42E-07	1.07E-13
2.27E-07	-2.59E-13
3.12E-07	-6.18E-13
3.97E-07	-9.64E-13
4.82E-07	-1.29E-12
5.68E-07	-1.60E-12
6.53E-07	-1.89E-12

a=1.3 e=1.0	
z[m]	Fz [N]
-8.33E-07	3.08E-12
-7.33E-07	2.91E-12
-6.33E-07	2.70E-12
-5.33E-07	2.46E-12
-4.33E-07	2.18E-12
-3.33E-07	1.87E-12
-2.33E-07	1.54E-12
-1.33E-07	1.19E-12
-3.33E-08	8.19E-13
6.66E-08	4.46E-13
1.67E-07	6.92E-14
2.66E-07	-3.04E-13
3.66E-07	-6.69E-13
4.66E-07	-1.02E-12
5.66E-07	-1.35E-12
6.66E-07	-1.67E-12
7.66E-07	-1.95E-12

a=1.4 e=1.0	
z[m]	Fz [N]
-9.66E-07	2.90E-12
-8.50E-07	2.75E-12
-7.34E-07	2.57E-12
-6.18E-07	2.34E-12
-5.02E-07	2.08E-12
-3.86E-07	1.79E-12
-2.70E-07	1.47E-12
-1.55E-07	1.13E-12
-3.86E-08	7.68E-13
7.73E-08	3.99E-13
1.93E-07	2.60E-14
3.09E-07	-3.45E-13
4.25E-07	-7.08E-13
5.41E-07	-1.06E-12
6.57E-07	-1.39E-12
7.73E-07	-1.70E-12
8.88E-07	-1.98E-12

a=1.5 e=1.0	
z[m]	Fz [N]
-1.11E-06	2.71E-12
-9.76E-07	2.58E-12
-8.43E-07	2.41E-12
-7.10E-07	2.20E-12
-5.76E-07	1.96E-12
-4.43E-07	1.69E-12
-3.10E-07	1.38E-12
-1.77E-07	1.05E-12
-4.43E-08	7.08E-13
8.87E-08	3.50E-13
2.22E-07	-1.35E-14
3.55E-07	-3.76E-13
4.88E-07	-7.31E-13
6.21E-07	-1.07E-12
7.54E-07	-1.40E-12
8.87E-07	-1.70E-12
1.02E-06	-1.98E-12

- e=1.1**

a=0.5 e=1.1	
z[m]	Fz [N]
-1.23E-07	-2.53E-12
-1.08E-07	-2.58E-12
-9.36E-08	-2.62E-12
-7.88E-08	-2.65E-12
-6.41E-08	-2.68E-12
-4.93E-08	-2.70E-12
-3.45E-08	-2.72E-12
-1.97E-08	-2.73E-12
-4.93E-09	-2.73E-12
9.85E-09	-2.73E-12
2.46E-08	-2.72E-12
3.94E-08	-2.70E-12
5.42E-08	-2.68E-12
6.90E-08	-2.65E-12
8.38E-08	-2.61E-12
9.85E-08	-2.58E-12
1.13E-07	-2.54E-12

a=0.6 e=1.1	
z[m]	Fz [N]
-1.77E-07	-9.72E-13
-1.56E-07	-1.10E-12
-1.35E-07	-1.21E-12
-1.14E-07	-1.30E-12
-9.22E-08	-1.38E-12
-7.10E-08	-1.45E-12
-4.97E-08	-1.50E-12
-2.84E-08	-1.55E-12
-7.10E-09	-1.58E-12
1.42E-08	-1.60E-12
3.55E-08	-1.62E-12
5.68E-08	-1.63E-12
7.80E-08	-1.63E-12
9.93E-08	-1.64E-12
1.21E-07	-1.64E-12
1.42E-07	-1.64E-12
1.63E-07	-1.64E-12

a=0.7 e=1.1	
z[m]	Fz [N]
-2.41E-07	6.71E-13
-2.12E-07	4.54E-13
-1.83E-07	2.56E-13
-1.55E-07	7.71E-14
-1.26E-07	-8.44E-14
-9.66E-08	-2.29E-13
-6.76E-08	-3.60E-13
-3.86E-08	-4.77E-13
-9.66E-09	-5.83E-13
1.93E-08	-6.80E-13
4.83E-08	-7.71E-13
7.73E-08	-8.57E-13
1.06E-07	-9.42E-13
1.35E-07	-1.03E-12
1.64E-07	-1.12E-12
1.93E-07	-1.22E-12
2.22E-07	-1.32E-12

a=0.8 e=1.1	
z[m]	Fz [N]
-3.15E-07	2.04E-12
-2.78E-07	1.75E-12
-2.40E-07	1.48E-12
-2.02E-07	1.22E-12
-1.64E-07	9.77E-13
-1.26E-07	7.47E-13
-8.83E-08	5.30E-13
-5.05E-08	3.25E-13
-1.26E-08	1.30E-13
2.52E-08	-5.74E-14
6.31E-08	-2.40E-13
1.01E-07	-4.19E-13
1.39E-07	-5.98E-13
1.77E-07	-7.78E-13
2.14E-07	-9.60E-13
2.52E-07	-1.15E-12
2.90E-07	-1.34E-12

a=0.9 e=1.1	
z[m]	Fz [N]
-3.99E-07	2.97E-12
-3.51E-07	2.66E-12
-3.03E-07	2.35E-12
-2.55E-07	2.04E-12
-2.08E-07	1.74E-12
-1.60E-07	1.44E-12
-1.12E-07	1.15E-12
-6.39E-08	8.62E-13
-1.60E-08	5.86E-13
3.19E-08	3.16E-13
7.98E-08	5.16E-14
1.28E-07	-2.09E-13
1.76E-07	-4.66E-13
2.24E-07	-7.20E-13
2.71E-07	-9.71E-13
3.19E-07	-1.22E-12
3.67E-07	-1.45E-12

a=1.0 e=1.1	
z[m]	Fz [N]
-2.38E-07	2.07E-12
-1.67E-07	1.70E-12
-9.54E-08	1.33E-12
-2.38E-08	9.56E-13
4.77E-08	5.82E-13
1.19E-07	2.14E-13
1.91E-07	-1.47E-13
2.62E-07	-4.97E-13
3.34E-07	-8.33E-13
4.05E-07	-1.15E-12
4.77E-07	-1.45E-12
-2.38E-07	2.07E-12
-1.67E-07	1.70E-12

a=1.1 e=1.1	
z[m]	Fz [N]
-5.96E-07	3.68E-12
-5.25E-07	3.41E-12
-4.53E-07	3.11E-12
-3.82E-07	2.78E-12
-3.10E-07	2.43E-12
-2.38E-07	2.07E-12
-1.67E-07	1.70E-12
-9.54E-08	1.33E-12
-2.38E-08	9.56E-13
4.77E-08	5.82E-13
1.19E-07	2.14E-13
1.91E-07	-1.47E-13
2.62E-07	-4.97E-13
3.34E-07	-8.33E-13
4.05E-07	-1.15E-12
4.77E-07	-1.45E-12
5.49E-07	-1.73E-12

a=1.2 e=1.1	
z[m]	Fz [N]
-7.10E-07	3.67E-12
-6.24E-07	3.43E-12
-5.39E-07	3.15E-12
-4.54E-07	2.84E-12
-3.69E-07	2.50E-12
-2.84E-07	2.14E-12
-1.99E-07	1.76E-12
-1.14E-07	1.37E-12
-2.84E-08	9.76E-13
5.68E-08	5.81E-13
1.42E-07	1.90E-13
2.27E-07	-1.93E-13
3.12E-07	-5.63E-13
3.97E-07	-9.17E-13
4.82E-07	-1.25E-12
5.68E-07	-1.56E-12
6.53E-07	-1.85E-12

a=1.3 e=1.1	
z[m]	Fz [N]
-8.33E-07	3.56E-12
-7.33E-07	3.34E-12
-6.33E-07	3.08E-12
-5.33E-07	2.79E-12
-4.33E-07	2.46E-12
-3.33E-07	2.11E-12
-2.33E-07	1.73E-12
-1.33E-07	1.34E-12
-3.33E-08	9.43E-13
6.66E-08	5.40E-13
1.67E-07	1.41E-13
2.66E-07	-2.49E-13
3.66E-07	-6.26E-13
4.66E-07	-9.85E-13
5.66E-07	-1.32E-12
6.66E-07	-1.63E-12
7.66E-07	-1.92E-12

a=1.4 e=1.1	
z[m]	Fz [N]
-9.66E-07	3.39E-12
-8.50E-07	3.19E-12
-7.34E-07	2.95E-12
-6.18E-07	2.68E-12
-5.02E-07	2.37E-12
-3.86E-07	2.03E-12
-2.70E-07	1.66E-12
-1.55E-07	1.28E-12
-3.86E-08	8.83E-13
7.73E-08	4.84E-13
1.93E-07	8.77E-14
3.09E-07	-3.00E-13
4.25E-07	-6.74E-13
5.41E-07	-1.03E-12
6.57E-07	-1.36E-12
7.73E-07	-1.67E-12
8.88E-07	-1.94E-12

a=1.5 e=1.1	
z[m]	Fz [N]
-1.11E-06	3.21E-12
-9.76E-07	3.02E-12
-8.43E-07	2.80E-12
-7.10E-07	2.54E-12
-5.76E-07	2.24E-12
-4.43E-07	1.92E-12
-3.10E-07	1.57E-12
-1.77E-07	1.20E-12
-4.43E-08	8.13E-13
8.87E-08	4.25E-13
2.22E-07	3.94E-14
3.55E-07	-3.38E-13
4.88E-07	-7.01E-13
6.21E-07	-1.05E-12
7.54E-07	-1.37E-12
8.87E-07	-1.66E-12
1.02E-06	-1.93E-12

- e=1.2**

a=0.5 e=1.2	
z[m]	Fz [N]
-1.23E-07	-3.21E-12
-1.08E-07	-3.27E-12
-9.36E-08	-3.32E-12
-7.88E-08	-3.36E-12
-6.41E-08	-3.38E-12
-4.93E-08	-3.39E-12
-3.45E-08	-3.40E-12
-1.97E-08	-3.39E-12
-4.93E-09	-3.37E-12
9.85E-09	-3.34E-12
2.46E-08	-3.30E-12
3.94E-08	-3.25E-12
5.42E-08	-3.20E-12
6.90E-08	-3.13E-12
8.38E-08	-3.06E-12
9.85E-08	-2.99E-12
1.13E-07	-2.91E-12

a=0.6 e=1.2	
z[m]	Fz [N]
-1.77E-07	-1.53E-12
-1.56E-07	-1.66E-12
-1.35E-07	-1.77E-12
-1.14E-07	-1.87E-12
-9.22E-08	-1.95E-12
-7.10E-08	-2.01E-12
-4.97E-08	-2.05E-12
-2.84E-08	-2.08E-12
-7.10E-09	-2.10E-12
1.42E-08	-2.10E-12
3.55E-08	-2.09E-12
5.68E-08	-2.07E-12
7.80E-08	-2.05E-12
9.93E-08	-2.02E-12
1.21E-07	-1.99E-12
1.42E-07	-1.96E-12
1.63E-07	-1.94E-12

a=0.7 e=1.2	
z[m]	Fz [N]
-2.41E-07	2.15E-13
-2.12E-07	-6.39E-15
-1.83E-07	-2.07E-13
-1.55E-07	-3.87E-13
-1.26E-07	-5.47E-13
-9.66E-08	-6.88E-13
-6.76E-08	-8.11E-13
-3.86E-08	-9.17E-13
-9.66E-09	-1.01E-12
1.93E-08	-1.09E-12
4.83E-08	-1.16E-12
7.73E-08	-1.22E-12
1.06E-07	-1.28E-12
1.35E-07	-1.34E-12
1.64E-07	-1.41E-12
1.93E-07	-1.48E-12
2.22E-07	-1.56E-12

a=0.8 e=1.2	
z[m]	Fz [N]
-3.15E-07	1.70E-12
-2.78E-07	1.40E-12
-2.40E-07	1.12E-12
-2.02E-07	8.58E-13
-1.64E-07	6.11E-13
-1.26E-07	3.81E-13
-8.83E-08	1.68E-13
-5.05E-08	-3.09E-14
-1.26E-08	-2.16E-13
2.52E-08	-3.91E-13
6.31E-08	-5.58E-13
1.01E-07	-7.20E-13
1.39E-07	-8.80E-13
1.77E-07	-1.04E-12
2.14E-07	-1.20E-12
2.52E-07	-1.37E-12
2.90E-07	-1.54E-12

a=0.9 e=1.2	
z[m]	Fz [N]
-3.99E-07	2.76E-12
-3.51E-07	2.43E-12
-3.03E-07	2.10E-12
-2.55E-07	1.78E-12
-2.08E-07	1.46E-12
-1.60E-07	1.16E-12
-1.12E-07	8.65E-13
-6.39E-08	5.82E-13
-1.60E-08	3.10E-13
3.19E-08	4.63E-14
7.98E-08	-2.10E-13
1.28E-07	-4.60E-13
1.76E-07	-7.06E-13
2.24E-07	-9.48E-13
2.71E-07	-1.19E-12
3.19E-07	-1.42E-12
3.67E-07	-1.65E-12

a=1.0 e=1.2	
z[m]	Fz [N]
-4.93E-07	3.37E-12
-4.34E-07	3.05E-12
-3.74E-07	2.71E-12
-3.15E-07	2.37E-12
-2.56E-07	2.02E-12
-1.97E-07	1.66E-12
-1.38E-07	1.31E-12
-7.88E-08	9.66E-13
-1.97E-08	6.27E-13
3.94E-08	2.94E-13
9.85E-08	-3.16E-14
1.58E-07	-3.50E-13
2.17E-07	-6.59E-13
2.76E-07	-9.60E-13
3.35E-07	-1.25E-12
3.94E-07	-1.53E-12
4.53E-07	-1.79E-12

a=1.1	e=1.2
z[m]	Fz [N]
-5.96E-07	3.64E-12
-5.25E-07	3.35E-12
-4.53E-07	3.03E-12
-3.82E-07	2.68E-12
-3.10E-07	2.32E-12
-2.38E-07	1.94E-12
-1.67E-07	1.56E-12
-9.54E-08	1.17E-12
-2.38E-08	7.91E-13
4.77E-08	4.12E-13
1.19E-07	3.87E-14
1.91E-07	-3.25E-13
2.62E-07	-6.78E-13
3.34E-07	-1.02E-12
4.05E-07	-1.34E-12
4.77E-07	-1.64E-12
5.49E-07	-1.93E-12

a=1.2	e=1.2
z[m]	Fz [N]
-7.10E-07	3.68E-12
-6.24E-07	3.42E-12
-5.39E-07	3.12E-12
-4.54E-07	2.79E-12
-3.69E-07	2.44E-12
-2.84E-07	2.06E-12
-1.99E-07	1.66E-12
-1.14E-07	1.26E-12
-2.84E-08	8.53E-13
5.68E-08	4.47E-13
1.42E-07	4.71E-14
2.27E-07	-3.44E-13
3.12E-07	-7.21E-13
3.97E-07	-1.08E-12
4.82E-07	-1.42E-12
5.68E-07	-1.74E-12
6.53E-07	-2.04E-12

a=1.3	e=1.2
z[m]	Fz [N]
-8.33E-07	3.59E-12
-7.33E-07	3.36E-12
-6.33E-07	3.09E-12
-5.33E-07	2.78E-12
-4.33E-07	2.44E-12
-3.33E-07	2.07E-12
-2.33E-07	1.67E-12
-1.33E-07	1.27E-12
-3.33E-08	8.53E-13
6.66E-08	4.37E-13
1.67E-07	2.55E-14
2.66E-07	-3.77E-13
3.66E-07	-7.65E-13
4.66E-07	-1.14E-12
5.66E-07	-1.48E-12
6.66E-07	-1.81E-12
7.66E-07	-2.10E-12

a=1.4 e=1.2	
z[m]	Fz [N]
-9.66E-07	3.44E-12
-8.50E-07	3.23E-12
-7.34E-07	2.98E-12
-6.18E-07	2.69E-12
-5.02E-07	2.37E-12
-3.86E-07	2.01E-12
-2.70E-07	1.63E-12
-1.55E-07	1.23E-12
-3.86E-08	8.19E-13
7.73E-08	4.05E-13
1.93E-07	-6.15E-15
3.09E-07	-4.08E-13
4.25E-07	-7.96E-13
5.41E-07	-1.17E-12
6.57E-07	-1.51E-12
7.73E-07	-1.83E-12
8.88E-07	-2.13E-12

a=1.5 e=1.2	
z[m]	Fz [N]
-1.11E-06	3.26E-12
-9.76E-07	3.07E-12
-8.43E-07	2.84E-12
-7.10E-07	2.57E-12
-5.76E-07	2.26E-12
-4.43E-07	1.92E-12
-3.10E-07	1.55E-12
-1.77E-07	1.17E-12
-4.43E-08	7.68E-13
8.87E-08	3.65E-13
2.22E-07	-3.71E-14
3.55E-07	-4.31E-13
4.88E-07	-8.11E-13
6.21E-07	-1.17E-12
7.54E-07	-1.51E-12
8.87E-07	-1.83E-12
1.02E-06	-2.12E-12

- e=1.3**

a=0.5 e=1.3	
z[m]	Fz [N]
-1.23E-07	-3.84E-12
-1.08E-07	-3.91E-12
-9.36E-08	-3.96E-12
-7.88E-08	-4.00E-12
-6.41E-08	-4.02E-12
-4.93E-08	-4.02E-12
-3.45E-08	-4.01E-12
-1.97E-08	-3.98E-12
-4.93E-09	-3.94E-12
9.85E-09	-3.89E-12
2.46E-08	-3.82E-12
3.94E-08	-3.74E-12
5.42E-08	-3.66E-12
6.90E-08	-3.56E-12
8.38E-08	-3.46E-12
9.85E-08	-3.35E-12
1.13E-07	-3.24E-12

a=0.6 e=1.3	
z[m]	Fz [N]
-1.77E-07	-1.98E-12
-1.56E-07	-2.11E-12
-1.35E-07	-2.22E-12
-1.14E-07	-2.32E-12
-9.22E-08	-2.39E-12
-7.10E-08	-2.44E-12
-4.97E-08	-2.47E-12
-2.84E-08	-2.49E-12
-7.10E-09	-2.49E-12
1.42E-08	-2.47E-12
3.55E-08	-2.44E-12
5.68E-08	-2.40E-12
7.80E-08	-2.35E-12
9.93E-08	-2.31E-12
1.21E-07	-2.26E-12
1.42E-07	-2.21E-12
1.63E-07	-2.18E-12

a=0.7 e=1.3	
z[m]	Fz [N]
-2.41E-07	-1.47E-13
-2.12E-07	-3.59E-13
-1.83E-07	-5.50E-13
-1.55E-07	-7.20E-13
-1.26E-07	-8.70E-13
-9.66E-08	-1.00E-12
-6.76E-08	-1.11E-12
-3.86E-08	-1.20E-12
-9.66E-09	-1.28E-12
1.93E-08	-1.35E-12
4.83E-08	-1.40E-12
7.73E-08	-1.45E-12
1.06E-07	-1.50E-12
1.35E-07	-1.55E-12
1.64E-07	-1.61E-12
1.93E-07	-1.67E-12
2.22E-07	-1.75E-12

a=0.8	e=1.3
z[m]	Fz [N]
-3.15E-07	1.41E-12
-2.78E-07	1.12E-12
-2.40E-07	8.55E-13
-2.02E-07	6.04E-13
-1.64E-07	3.69E-13
-1.26E-07	1.52E-13
-8.83E-08	-4.88E-14
-5.05E-08	-2.35E-13
-1.26E-08	-4.09E-13
2.52E-08	-5.73E-13
6.31E-08	-7.31E-13
1.01E-07	-8.85E-13
1.39E-07	-1.04E-12
1.77E-07	-1.19E-12
2.14E-07	-1.36E-12
2.52E-07	-1.52E-12
2.90E-07	-1.70E-12

a=0.9	e=1.3
z[m]	Fz [N]
-3.99E-07	2.54E-12
-3.51E-07	2.22E-12
-3.03E-07	1.90E-12
-2.55E-07	1.59E-12
-2.08E-07	1.29E-12
-1.60E-07	9.98E-13
-1.12E-07	7.16E-13
-6.39E-08	4.43E-13
-1.60E-08	1.78E-13
3.19E-08	-7.87E-14
7.98E-08	-3.31E-13
1.28E-07	-5.79E-13
1.76E-07	-8.26E-13
2.24E-07	-1.07E-12
2.71E-07	-1.32E-12
3.19E-07	-1.56E-12
3.67E-07	-1.81E-12

a=1.0	e=1.3
z[m]	Fz [N]
-4.93E-07	3.22E-12
-4.34E-07	2.91E-12
-3.74E-07	2.58E-12
-3.15E-07	2.24E-12
-2.56E-07	1.90E-12
-1.97E-07	1.56E-12
-1.38E-07	1.22E-12
-7.88E-08	8.79E-13
-1.97E-08	5.44E-13
3.94E-08	2.13E-13
9.85E-08	-1.14E-13
1.58E-07	-4.36E-13
2.17E-07	-7.55E-13
2.76E-07	-1.07E-12
3.35E-07	-1.37E-12
3.94E-07	-1.67E-12
4.53E-07	-1.96E-12

a=1.1	e=1.3
z[m]	Fz [N]
-5.96E-07	3.52E-12
-5.25E-07	3.24E-12
-4.53E-07	2.93E-12
-3.82E-07	2.60E-12
-3.10E-07	2.25E-12
-2.38E-07	1.88E-12
-1.67E-07	1.51E-12
-9.54E-08	1.13E-12
-2.38E-08	7.48E-13
4.77E-08	3.66E-13
1.19E-07	-1.28E-14
1.91E-07	-3.87E-13
2.62E-07	-7.55E-13
3.34E-07	-1.11E-12
4.05E-07	-1.46E-12
4.77E-07	-1.79E-12
5.49E-07	-2.10E-12

a=1.2	e=1.3
z[m]	Fz [N]
-7.10E-07	3.57E-12
-6.24E-07	3.33E-12
-5.39E-07	3.05E-12
-4.54E-07	2.74E-12
-3.69E-07	2.40E-12
-2.84E-07	2.03E-12
-1.99E-07	1.65E-12
-1.14E-07	1.25E-12
-2.84E-08	8.41E-13
5.68E-08	4.30E-13
1.42E-07	2.02E-14
2.27E-07	-3.86E-13
3.12E-07	-7.83E-13
3.97E-07	-1.17E-12
4.82E-07	-1.54E-12
5.68E-07	-1.89E-12
6.53E-07	-2.22E-12

a=1.3	e=1.3
z[m]	Fz [N]
-8.33E-07	3.46E-12
-7.33E-07	3.26E-12
-6.33E-07	3.02E-12
-5.33E-07	2.73E-12
-4.33E-07	2.41E-12
-3.33E-07	2.06E-12
-2.33E-07	1.68E-12
-1.33E-07	1.28E-12
-3.33E-08	8.64E-13
6.66E-08	4.42E-13
1.67E-07	1.86E-14
2.66E-07	-4.02E-13
3.66E-07	-8.14E-13
4.66E-07	-1.21E-12
5.66E-07	-1.59E-12
6.66E-07	-1.95E-12
7.66E-07	-2.29E-12

a=1.4	e=1.3
z[m]	Fz [N]
-9.66E-07	3.28E-12
-8.50E-07	3.11E-12
-7.34E-07	2.90E-12
-6.18E-07	2.64E-12
-5.02E-07	2.35E-12
-3.86E-07	2.01E-12
-2.70E-07	1.65E-12
-1.55E-07	1.26E-12
-3.86E-08	8.47E-13
7.73E-08	4.27E-13
1.93E-07	2.36E-15
3.09E-07	-4.21E-13
4.25E-07	-8.36E-13
5.41E-07	-1.24E-12
6.57E-07	-1.62E-12
7.73E-07	-1.99E-12
8.88E-07	-2.32E-12

a=1.5	e=1.3
z[m]	Fz [N]
-1.11E-06	3.07E-12
-9.76E-07	2.92E-12
-8.43E-07	2.74E-12
-7.10E-07	2.51E-12
-5.76E-07	2.23E-12
-4.43E-07	1.92E-12
-3.10E-07	1.58E-12
-1.77E-07	1.20E-12
-4.43E-08	8.09E-13
8.87E-08	3.99E-13
2.22E-07	-1.74E-14
3.55E-07	-4.35E-13
4.88E-07	-8.46E-13
6.21E-07	-1.25E-12
7.54E-07	-1.63E-12
8.87E-07	-1.99E-12
1.02E-06	-2.33E-12

- **e=1.4**

a=0.5	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-1.23E-07	-3.60E-12
-1.08E-07	-3.65E-12
-9.36E-08	-3.67E-12
-7.88E-08	-3.68E-12
-6.41E-08	-3.68E-12
-4.93E-08	-3.66E-12
-3.45E-08	-3.62E-12
-1.97E-08	-3.58E-12
-4.93E-09	-3.52E-12
9.85E-09	-3.45E-12
2.46E-08	-3.37E-12
3.94E-08	-3.28E-12
5.42E-08	-3.18E-12
6.90E-08	-3.08E-12
8.38E-08	-2.98E-12
9.85E-08	-2.88E-12
1.13E-07	-2.79E-12

a=0.6	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-1.77E-07	-1.70E-12
-1.56E-07	-1.80E-12
-1.35E-07	-1.89E-12
-1.14E-07	-1.96E-12
-9.22E-08	-2.01E-12
-7.10E-08	-2.04E-12
-4.97E-08	-2.06E-12
-2.84E-08	-2.06E-12
-7.10E-09	-2.05E-12
1.42E-08	-2.03E-12
3.55E-08	-2.00E-12
5.68E-08	-1.97E-12
7.80E-08	-1.93E-12
9.93E-08	-1.91E-12
1.21E-07	-1.88E-12
1.42E-07	-1.87E-12
1.63E-07	-1.86E-12

a=0.7	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-2.41E-07	1.07E-13
-2.12E-07	-7.49E-14
-1.83E-07	-2.39E-13
-1.55E-07	-3.85E-13
-1.26E-07	-5.14E-13
-9.66E-08	-6.27E-13
-6.76E-08	-7.25E-13
-3.86E-08	-8.12E-13
-9.66E-09	-8.88E-13
1.93E-08	-9.58E-13
4.83E-08	-1.02E-12
7.73E-08	-1.09E-12
1.06E-07	-1.16E-12
1.35E-07	-1.24E-12
1.64E-07	-1.32E-12
1.93E-07	-1.42E-12
2.22E-07	-1.53E-12

a=0.8	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-3.15E-07	1.64E-12
-2.78E-07	1.38E-12
-2.40E-07	1.14E-12
-2.02E-07	9.05E-13
-1.64E-07	6.88E-13
-1.26E-07	4.84E-13
-8.83E-08	2.90E-13
-5.05E-08	1.06E-13
-1.26E-08	-7.12E-14
2.52E-08	-2.45E-13
6.31E-08	-4.18E-13
1.01E-07	-5.92E-13
1.39E-07	-7.72E-13
1.77E-07	-9.58E-13
2.14E-07	-1.15E-12
2.52E-07	-1.35E-12
2.90E-07	-1.57E-12

a=0.9	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-3.99E-07	2.77E-12
-3.51E-07	2.47E-12
-3.03E-07	2.17E-12
-2.55E-07	1.87E-12
-2.08E-07	1.58E-12
-1.60E-07	1.30E-12
-1.12E-07	1.02E-12
-6.39E-08	7.41E-13
-1.60E-08	4.68E-13
3.19E-08	1.96E-13
7.98E-08	-7.61E-14
1.28E-07	-3.51E-13
1.76E-07	-6.29E-13
2.24E-07	-9.11E-13
2.71E-07	-1.20E-12
3.19E-07	-1.49E-12
3.67E-07	-1.78E-12

a=1.0	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-4.93E-07	3.46E-12
-4.34E-07	3.16E-12
-3.74E-07	2.84E-12
-3.15E-07	2.51E-12
-2.56E-07	2.18E-12
-1.97E-07	1.83E-12
-1.38E-07	1.49E-12
-7.88E-08	1.14E-12
-1.97E-08	7.94E-13
3.94E-08	4.43E-13
9.85E-08	9.04E-14
1.58E-07	-2.64E-13
2.17E-07	-6.20E-13
2.76E-07	-9.75E-13
3.35E-07	-1.33E-12
3.94E-07	-1.68E-12
4.53E-07	-2.01E-12

a=1.1	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-5.96E-07	3.76E-12
-5.25E-07	3.49E-12
-4.53E-07	3.19E-12
-3.82E-07	2.86E-12
-3.10E-07	2.51E-12
-2.38E-07	2.14E-12
-1.67E-07	1.76E-12
-9.54E-08	1.37E-12
-2.38E-08	9.67E-13
4.77E-08	5.61E-13
1.19E-07	1.52E-13
1.91E-07	-2.58E-13
2.62E-07	-6.67E-13
3.34E-07	-1.07E-12
4.05E-07	-1.47E-12
4.77E-07	-1.85E-12
5.49E-07	-2.21E-12

a=1.2	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-7.10E-07	3.80E-12
-6.24E-07	3.57E-12
-5.39E-07	3.30E-12
-4.54E-07	2.99E-12
-3.69E-07	2.64E-12
-2.84E-07	2.27E-12
-1.99E-07	1.88E-12
-1.14E-07	1.46E-12
-2.84E-08	1.04E-12
5.68E-08	6.00E-13
1.42E-07	1.57E-13
2.27E-07	-2.86E-13
3.12E-07	-7.26E-13
3.97E-07	-1.16E-12
4.82E-07	-1.57E-12
5.68E-07	-1.97E-12
6.53E-07	-2.34E-12

a=1.3	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-8.33E-07	3.68E-12
-7.33E-07	3.49E-12
-6.33E-07	3.25E-12
-5.33E-07	2.97E-12
-4.33E-07	2.64E-12
-3.33E-07	2.28E-12
-2.33E-07	1.89E-12
-1.33E-07	1.48E-12
-3.33E-08	1.04E-12
6.66E-08	5.94E-13
1.67E-07	1.37E-13
2.66E-07	-3.22E-13
3.66E-07	-7.76E-13
4.66E-07	-1.22E-12
5.66E-07	-1.64E-12
6.66E-07	-2.05E-12
7.66E-07	-2.43E-12

a=1.4	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-9.66E-07	3.47E-12
-8.50E-07	3.32E-12
-7.34E-07	3.11E-12
-6.18E-07	2.86E-12
-5.02E-07	2.56E-12
-3.86E-07	2.22E-12
-2.70E-07	1.85E-12
-1.55E-07	1.44E-12
-3.86E-08	1.01E-12
7.73E-08	5.65E-13
1.93E-07	1.07E-13
3.09E-07	-3.54E-13
4.25E-07	-8.10E-13
5.41E-07	-1.26E-12
6.57E-07	-1.68E-12
7.73E-07	-2.09E-12
8.88E-07	-2.47E-12

a=1.5	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-1.11E-06	3.23E-12
-9.76E-07	3.10E-12
-8.43E-07	2.93E-12
-7.10E-07	2.70E-12
-5.76E-07	2.43E-12
-4.43E-07	2.12E-12
-3.10E-07	1.77E-12
-1.77E-07	1.38E-12
-4.43E-08	9.63E-13
8.87E-08	5.27E-13
2.22E-07	7.75E-14
3.55E-07	-3.77E-13
4.88E-07	-8.29E-13
6.21E-07	-1.27E-12
7.54E-07	-1.70E-12
8.87E-07	-2.10E-12
1.02E-06	-2.48E-12

- **e=1.5**

a=0.5	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-1.23E-07	-3.16E-12
-1.08E-07	-3.16E-12
-9.36E-08	-3.15E-12
-7.88E-08	-3.12E-12
-6.41E-08	-3.07E-12
-4.93E-08	-3.01E-12
-3.45E-08	-2.93E-12
-1.97E-08	-2.85E-12
-4.93E-09	-2.75E-12
9.85E-09	-2.65E-12
2.46E-08	-2.54E-12
3.94E-08	-2.43E-12
5.42E-08	-2.33E-12
6.90E-08	-2.22E-12
8.38E-08	-2.12E-12
9.85E-08	-2.03E-12
1.13E-07	-1.95E-12

a=0.6	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-1.77E-07	-1.29E-12
-1.56E-07	-1.36E-12
-1.35E-07	-1.41E-12
-1.14E-07	-1.44E-12
-9.22E-08	-1.45E-12
-7.10E-08	-1.46E-12
-4.97E-08	-1.44E-12
-2.84E-08	-1.42E-12
-7.10E-09	-1.39E-12
1.42E-08	-1.35E-12
3.55E-08	-1.32E-12
5.68E-08	-1.28E-12
7.80E-08	-1.26E-12
9.93E-08	-1.24E-12
1.21E-07	-1.23E-12
1.42E-07	-1.24E-12
1.63E-07	-1.27E-12

a=0.7	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-2.41E-07	4.22E-13
-2.12E-07	2.75E-13
-1.83E-07	1.45E-13
-1.55E-07	2.95E-14
-1.26E-07	-7.13E-14
-9.66E-08	-1.59E-13
-6.76E-08	-2.37E-13
-3.86E-08	-3.07E-13
-9.66E-09	-3.72E-13
1.93E-08	-4.35E-13
4.83E-08	-5.02E-13
7.73E-08	-5.73E-13
1.06E-07	-6.53E-13
1.35E-07	-7.44E-13
1.64E-07	-8.47E-13
1.93E-07	-9.64E-13
2.22E-07	-1.10E-12

a=0.8	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-3.15E-07	1.88E-12
-2.78E-07	1.65E-12
-2.40E-07	1.43E-12
-2.02E-07	1.22E-12
-1.64E-07	1.03E-12
-1.26E-07	8.44E-13
-8.83E-08	6.66E-13
-5.05E-08	4.93E-13
-1.26E-08	3.22E-13
2.52E-08	1.50E-13
6.31E-08	-2.64E-14
1.01E-07	-2.09E-13
1.39E-07	-4.01E-13
1.77E-07	-6.03E-13
2.14E-07	-8.17E-13
2.52E-07	-1.04E-12
2.90E-07	-1.28E-12

a=0.9	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-3.99E-07	2.98E-12
-3.51E-07	2.69E-12
-3.03E-07	2.41E-12
-2.55E-07	2.13E-12
-2.08E-07	1.85E-12
-1.60E-07	1.58E-12
-1.12E-07	1.30E-12
-6.39E-08	1.03E-12
-1.60E-08	7.63E-13
3.19E-08	4.88E-13
7.98E-08	2.08E-13
1.28E-07	-7.85E-14
1.76E-07	-3.73E-13
2.24E-07	-6.75E-13
2.71E-07	-9.86E-13
3.19E-07	-1.30E-12
3.67E-07	-1.62E-12

a=1.0	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-4.93E-07	3.65E-12
-4.34E-07	3.35E-12
-3.74E-07	3.04E-12
-3.15E-07	2.72E-12
-2.56E-07	2.39E-12
-1.97E-07	2.06E-12
-1.38E-07	1.71E-12
-7.88E-08	1.37E-12
-1.97E-08	1.02E-12
3.94E-08	6.56E-13
9.85E-08	2.92E-13
1.58E-07	-7.87E-14
2.17E-07	-4.54E-13
2.76E-07	-8.33E-13
3.35E-07	-1.21E-12
3.94E-07	-1.59E-12
4.53E-07	-1.96E-12

a=1.1	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-5.96E-07	3.95E-12
-5.25E-07	3.67E-12
-4.53E-07	3.37E-12
-3.82E-07	3.04E-12
-3.10E-07	2.69E-12
-2.38E-07	2.32E-12
-1.67E-07	1.94E-12
-9.54E-08	1.54E-12
-2.38E-08	1.13E-12
4.77E-08	7.18E-13
1.19E-07	2.94E-13
1.91E-07	-1.35E-13
2.62E-07	-5.65E-13
3.34E-07	-9.93E-13
4.05E-07	-1.41E-12
4.77E-07	-1.82E-12
5.49E-07	-2.22E-12

a=1.2	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-7.10E-07	3.97E-12
-6.24E-07	3.74E-12
-5.39E-07	3.46E-12
-4.54E-07	3.15E-12
-3.69E-07	2.80E-12
-2.84E-07	2.43E-12
-1.99E-07	2.03E-12
-1.14E-07	1.61E-12
-2.84E-08	1.17E-12
5.68E-08	7.17E-13
1.42E-07	2.59E-13
2.27E-07	-2.03E-13
3.12E-07	-6.63E-13
3.97E-07	-1.12E-12
4.82E-07	-1.56E-12
5.68E-07	-1.98E-12
6.53E-07	-2.37E-12

a=1.3	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-8.33E-07	3.83E-12
-7.33E-07	3.64E-12
-6.33E-07	3.40E-12
-5.33E-07	3.11E-12
-4.33E-07	2.78E-12
-3.33E-07	2.42E-12
-2.33E-07	2.02E-12
-1.33E-07	1.59E-12
-3.33E-08	1.15E-12
6.66E-08	6.85E-13
1.67E-07	2.13E-13
2.66E-07	-2.63E-13
3.66E-07	-7.35E-13
4.66E-07	-1.20E-12
5.66E-07	-1.64E-12
6.66E-07	-2.06E-12
7.66E-07	-2.45E-12

a=1.4	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-9.66E-07	3.61E-12
-8.50E-07	3.45E-12
-7.34E-07	3.24E-12
-6.18E-07	2.99E-12
-5.02E-07	2.68E-12
-3.86E-07	2.34E-12
-2.70E-07	1.96E-12
-1.55E-07	1.54E-12
-3.86E-08	1.10E-12
7.73E-08	6.39E-13
1.93E-07	1.68E-13
3.09E-07	-3.07E-13
4.25E-07	-7.78E-13
5.41E-07	-1.24E-12
6.57E-07	-1.68E-12
7.73E-07	-2.10E-12
8.88E-07	-2.49E-12

a=1.5	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-1.11E-06	3.35E-12
-9.76E-07	3.22E-12
-8.43E-07	3.04E-12
-7.10E-07	2.81E-12
-5.76E-07	2.54E-12
-4.43E-07	2.22E-12
-3.10E-07	1.86E-12
-1.77E-07	1.46E-12
-4.43E-08	1.04E-12
8.87E-08	5.90E-13
2.22E-07	1.30E-13
3.55E-07	-3.36E-13
4.88E-07	-7.99E-13
6.21E-07	-1.25E-12
7.54E-07	-1.69E-12
8.87E-07	-2.10E-12
1.02E-06	-2.49E-12

Μετρήσεις από υποκεφάλαιο με την ακτινική μετατόπιση για $\lambda=1064\text{nm}$ & $e=0.7$.

X=0.25 μm & y=0.25 μm

e=0.7	a=0.5
z	Fz
-1.23E-07	-4.37E-13
-1.08E-07	-5.32E-13
-9.36E-08	-6.25E-13
-7.88E-08	-7.15E-13
-6.41E-08	-8.01E-13
-4.93E-08	-8.81E-13
-3.45E-08	-9.55E-13
-1.97E-08	-1.03E-12
-4.93E-09	-1.09E-12
9.85E-09	-1.15E-12
2.46E-08	-1.21E-12
3.94E-08	-1.26E-12
5.42E-08	-1.31E-12
6.90E-08	-1.36E-12
8.38E-08	-1.41E-12
9.85E-08	-1.45E-12
1.13E-07	-1.49E-12

e=0.7	a=0.6
z	Fz
-1.77E-07	1.95E-14
-1.56E-07	-5.46E-14
-1.35E-07	-1.32E-13
-1.14E-07	-2.13E-13
-9.22E-08	-2.95E-13
-7.10E-08	-3.77E-13
-4.97E-08	-4.58E-13
-2.84E-08	-5.36E-13
-7.10E-09	-6.12E-13
1.42E-08	-6.84E-13
3.55E-08	-7.51E-13
5.68E-08	-8.14E-13
7.80E-08	-8.72E-13
9.93E-08	-9.23E-13
1.21E-07	-9.68E-13
1.42E-07	-1.01E-12
1.63E-07	-1.04E-12

e=0.7	a=0.7
z	Fz
-2.41E-07	3.65E-13
-2.12E-07	2.85E-13
-1.83E-07	2.03E-13
-1.55E-07	1.20E-13
-1.26E-07	3.61E-14
-9.66E-08	-4.83E-14
-6.76E-08	-1.32E-13
-3.86E-08	-2.15E-13
-9.66E-09	-2.96E-13
1.93E-08	-3.73E-13
4.83E-08	-4.46E-13
7.73E-08	-5.15E-13
1.06E-07	-5.77E-13
1.35E-07	-6.33E-13
1.64E-07	-6.82E-13
1.93E-07	-7.24E-13
2.22E-07	-7.60E-13

e=0.7	a=0.8
z	Fz
-3.15E-07	6.86E-13
-2.78E-07	5.84E-13
-2.40E-07	4.83E-13
-2.02E-07	3.83E-13
-1.64E-07	2.85E-13
-1.26E-07	1.88E-13
-8.83E-08	9.23E-14
-5.05E-08	-5.93E-16
-1.26E-08	-9.02E-14
2.52E-08	-1.76E-13
6.31E-08	-2.56E-13
1.01E-07	-3.30E-13
1.39E-07	-3.98E-13
1.77E-07	-4.59E-13
2.14E-07	-5.12E-13
2.52E-07	-5.57E-13
2.90E-07	-5.94E-13

e=0.7	a=0.9
z	Fz
-3.99E-07	9.87E-13
-3.51E-07	8.58E-13
-3.03E-07	7.32E-13
-2.55E-07	6.09E-13
-2.08E-07	4.89E-13
-1.60E-07	3.73E-13
-1.12E-07	2.60E-13
-6.39E-08	1.53E-13
-1.60E-08	5.07E-14
3.19E-08	-4.51E-14
7.98E-08	-1.34E-13
1.28E-07	-2.15E-13
1.76E-07	-2.87E-13
2.24E-07	-3.50E-13
2.71E-07	-4.04E-13
3.19E-07	-4.48E-13
3.67E-07	-4.83E-13

e=0.7	a=1.0
z	Fz
-4.93E-07	1.27E-12
-4.34E-07	1.11E-12
-3.74E-07	9.56E-13
-3.15E-07	8.06E-13
-2.56E-07	6.62E-13
-1.97E-07	5.23E-13
-1.38E-07	3.91E-13
-7.88E-08	2.66E-13
-1.97E-08	1.50E-13
3.94E-08	4.33E-14
9.85E-08	-5.33E-14
1.58E-07	-1.39E-13
2.17E-07	-2.14E-13
2.76E-07	-2.76E-13
3.35E-07	-3.27E-13
3.94E-07	-3.66E-13
4.53E-07	-3.93E-13

e=0.7	a=1.1
z	Fz
-5.96E-07	1.52E-12
-5.25E-07	1.34E-12
-4.53E-07	1.16E-12
-3.82E-07	9.78E-13
-3.10E-07	8.07E-13
-2.38E-07	6.44E-13
-1.67E-07	4.91E-13
-9.54E-08	3.49E-13
-2.38E-08	2.19E-13
4.77E-08	1.03E-13
1.19E-07	-4.20E-16
1.91E-07	-8.88E-14
2.62E-07	-1.62E-13
3.34E-07	-2.20E-13
4.05E-07	-2.63E-13
4.77E-07	-2.90E-13
5.49E-07	-3.04E-13

e=0.7	a=1.2
z	Fz
-7.10E-07	1.76E-12
-6.24E-07	1.55E-12
-5.39E-07	1.33E-12
-4.54E-07	1.13E-12
-3.69E-07	9.29E-13
-2.84E-07	7.42E-13
-1.99E-07	5.68E-13
-1.14E-07	4.09E-13
-2.84E-08	2.66E-13
5.68E-08	1.41E-13
1.42E-07	3.40E-14
2.27E-07	-5.38E-14
3.12E-07	-1.22E-13
3.97E-07	-1.71E-13
4.82E-07	-2.01E-13
5.68E-07	-2.12E-13
6.53E-07	-2.06E-13

e=0.7	a=1.3
z	Fz
-8.33E-07	1.99E-12
-7.33E-07	1.74E-12
-6.33E-07	1.49E-12
-5.33E-07	1.26E-12
-4.33E-07	1.03E-12
-3.33E-07	8.21E-13
-2.33E-07	6.26E-13
-1.33E-07	4.51E-13
-3.33E-08	2.96E-13
6.66E-08	1.64E-13
1.67E-07	5.58E-14
2.66E-07	-2.80E-14
3.66E-07	-8.74E-14
4.66E-07	-1.23E-13
5.66E-07	-1.35E-13
6.66E-07	-1.25E-13
7.66E-07	-9.57E-14

e=0.7	a=1.4
z	Fz
-9.66E-07	2.20E-12
-8.50E-07	1.92E-12
-7.34E-07	1.64E-12
-6.18E-07	1.38E-12
-5.02E-07	1.12E-12
-3.86E-07	8.86E-13
-2.70E-07	6.70E-13
-1.55E-07	4.78E-13
-3.86E-08	3.13E-13
7.73E-08	1.76E-13
1.93E-07	6.95E-14
3.09E-07	-7.25E-15
4.25E-07	-5.42E-14
5.41E-07	-7.24E-14
6.57E-07	-6.34E-14
7.73E-07	-2.94E-14
8.88E-07	2.70E-14

e=0.7	a=1.5
z	Fz
-1.11E-06	2.42E-12
-9.76E-07	2.10E-12
-8.43E-07	1.79E-12
-7.10E-07	1.49E-12
-5.76E-07	1.20E-12
-4.43E-07	9.40E-13
-3.10E-07	7.02E-13
-1.77E-07	4.95E-13
-4.43E-08	3.20E-13
8.87E-08	1.81E-13
2.22E-07	7.78E-14
3.55E-07	1.10E-14
4.88E-07	-2.04E-14
6.21E-07	-1.82E-14
7.54E-07	1.50E-14
8.87E-07	7.60E-14
1.02E-06	1.61E-13

X=0 μm & y=0.25μm

e=0.7	a=0.5
z	Fz
-1.23E-07	-6.36E-13
-1.08E-07	-7.45E-13
-9.36E-08	-8.45E-13
-7.88E-08	-9.39E-13
-6.41E-08	-1.03E-12
-4.93E-08	-1.12E-12
-3.45E-08	-1.20E-12
-1.97E-08	-1.29E-12
-4.93E-09	-1.37E-12
9.85E-09	-1.46E-12
2.46E-08	-1.55E-12
3.94E-08	-1.63E-12
5.42E-08	-1.72E-12
6.90E-08	-1.81E-12
8.38E-08	-1.90E-12
9.85E-08	-1.99E-12
1.13E-07	-2.08E-12

e=0.7	a=0.6
z	Fz
-1.77E-07	3.70E-13
-1.56E-07	2.19E-13
-1.35E-07	7.22E-14
-1.14E-07	-7.04E-14
-9.22E-08	-2.08E-13
-7.10E-08	-3.41E-13
-4.97E-08	-4.70E-13
-2.84E-08	-5.94E-13
-7.10E-09	-7.15E-13
1.42E-08	-8.33E-13
3.55E-08	-9.48E-13
5.68E-08	-1.06E-12
7.80E-08	-1.17E-12
9.93E-08	-1.28E-12
1.21E-07	-1.38E-12
1.42E-07	-1.49E-12
1.63E-07	-1.58E-12

e=0.7	a=0.7
z	Fz
-2.41E-07	1.02E-12
-2.12E-07	8.62E-13
-1.83E-07	7.02E-13
-1.55E-07	5.43E-13
-1.26E-07	3.85E-13
-9.66E-08	2.30E-13
-6.76E-08	7.78E-14
-3.86E-08	-7.02E-14
-9.66E-09	-2.14E-13
1.93E-08	-3.53E-13
4.83E-08	-4.86E-13
7.73E-08	-6.14E-13
1.06E-07	-7.36E-13
1.35E-07	-8.51E-13
1.64E-07	-9.59E-13
1.93E-07	-1.06E-12
2.22E-07	-1.15E-12

e=0.7	a=0.8
z	Fz
-3.15E-07	1.45E-12
-2.78E-07	1.28E-12
-2.40E-07	1.11E-12
-2.02E-07	9.32E-13
-1.64E-07	7.58E-13
-1.26E-07	5.86E-13
-8.83E-08	4.17E-13
-5.05E-08	2.52E-13
-1.26E-08	9.28E-14
2.52E-08	-6.01E-14
6.31E-08	-2.06E-13
1.01E-07	-3.43E-13
1.39E-07	-4.71E-13
1.77E-07	-5.88E-13
2.14E-07	-6.95E-13
2.52E-07	-7.89E-13
2.90E-07	-8.70E-13

e=0.7	a=0.9
z	Fz
-3.99E-07	1.78E-12
-3.51E-07	1.58E-12
-3.03E-07	1.39E-12
-2.55E-07	1.19E-12
-2.08E-07	9.96E-13
-1.60E-07	8.04E-13
-1.12E-07	6.17E-13
-6.39E-08	4.36E-13
-1.60E-08	2.62E-13
3.19E-08	9.74E-14
7.98E-08	-5.75E-14
1.28E-07	-2.01E-13
1.76E-07	-3.32E-13
2.24E-07	-4.51E-13
2.71E-07	-5.55E-13
3.19E-07	-6.44E-13
3.67E-07	-7.19E-13

e=0.7	a=1.0
z	Fz
-4.93E-07	2.03E-12
-4.34E-07	1.81E-12
-3.74E-07	1.59E-12
-3.15E-07	1.37E-12
-2.56E-07	1.15E-12
-1.97E-07	9.41E-13
-1.38E-07	7.35E-13
-7.88E-08	5.37E-13
-1.97E-08	3.50E-13
3.94E-08	1.75E-13
9.85E-08	1.38E-14
1.58E-07	-1.33E-13
2.17E-07	-2.63E-13
2.76E-07	-3.76E-13
3.35E-07	-4.71E-13
3.94E-07	-5.49E-13
4.53E-07	-6.09E-13

e=0.7	a=1.1
z	Fz
-5.96E-07	2.23E-12
-5.25E-07	1.99E-12
-4.53E-07	1.74E-12
-3.82E-07	1.50E-12
-3.10E-07	1.26E-12
-2.38E-07	1.03E-12
-1.67E-07	8.02E-13
-9.54E-08	5.90E-13
-2.38E-08	3.92E-13
4.77E-08	2.10E-13
1.19E-07	4.71E-14
1.91E-07	-9.62E-14
2.62E-07	-2.19E-13
3.34E-07	-3.19E-13
4.05E-07	-3.98E-13
4.77E-07	-4.54E-13
5.49E-07	-4.88E-13

e=0.7	a=1.2
z	Fz
-7.10E-07	2.40E-12
-6.24E-07	2.13E-12
-5.39E-07	1.86E-12
-4.54E-07	1.60E-12
-3.69E-07	1.33E-12
-2.84E-07	1.08E-12
-1.99E-07	8.40E-13
-1.14E-07	6.15E-13
-2.84E-08	4.09E-13
5.68E-08	2.24E-13
1.42E-07	6.40E-14
2.27E-07	-7.08E-14
3.12E-07	-1.79E-13
3.97E-07	-2.60E-13
4.82E-07	-3.14E-13
5.68E-07	-3.41E-13
6.53E-07	-3.42E-13

e=0.7	a=1.3
z	Fz
-8.33E-07	2.56E-12
-7.33E-07	2.26E-12
-6.33E-07	1.97E-12
-5.33E-07	1.68E-12
-4.33E-07	1.39E-12
-3.33E-07	1.12E-12
-2.33E-07	8.60E-13
-1.33E-07	6.23E-13
-3.33E-08	4.12E-13
6.66E-08	2.28E-13
1.67E-07	7.43E-14
2.66E-07	-4.75E-14
3.66E-07	-1.37E-13
4.66E-07	-1.93E-13
5.66E-07	-2.18E-13
6.66E-07	-2.12E-13
7.66E-07	-1.78E-13

e=0.7	a=1.4
z	Fz
-9.66E-07	2.72E-12
-8.50E-07	2.39E-12
-7.34E-07	2.07E-12
-6.18E-07	1.75E-12
-5.02E-07	1.44E-12
-3.86E-07	1.14E-12
-2.70E-07	8.70E-13
-1.55E-07	6.23E-13
-3.86E-08	4.07E-13
7.73E-08	2.26E-13
1.93E-07	8.17E-14
3.09E-07	-2.40E-14
4.25E-07	-9.11E-14
5.41E-07	-1.20E-13
6.57E-07	-1.14E-13
7.73E-07	-7.39E-14
8.88E-07	-4.24E-15

e=0.7	a=1.5
z	Fz
-1.11E-06	2.89E-12
-9.76E-07	2.53E-12
-8.43E-07	2.17E-12
-7.10E-07	1.82E-12
-5.76E-07	1.48E-12
-4.43E-07	1.17E-12
-3.10E-07	8.74E-13
-1.77E-07	6.17E-13
-4.43E-08	3.98E-13
8.87E-08	2.20E-13
2.22E-07	8.75E-14
3.55E-07	-1.08E-16
4.88E-07	-4.32E-14
6.21E-07	-4.37E-14
7.54E-07	-5.02E-15
8.87E-07	6.87E-14
1.02E-06	1.73E-13

X=0.25μm & y=0μm

e=0.7	a=0.5
z	Fz
-1.23E-07	-1.73E-12
-1.08E-07	-1.83E-12
-9.36E-08	-1.92E-12
-7.88E-08	-1.99E-12
-6.41E-08	-2.07E-12
-4.93E-08	-2.13E-12
-3.45E-08	-2.19E-12
-1.97E-08	-2.24E-12
-4.93E-09	-2.29E-12
9.85E-09	-2.34E-12
2.46E-08	-2.38E-12
3.94E-08	-2.42E-12
5.42E-08	-2.46E-12
6.90E-08	-2.50E-12
8.38E-08	-2.53E-12
9.85E-08	-2.57E-12
1.13E-07	-2.61E-12

e=0.7	a=0.6
z	Fz
-1.77E-07	-5.29E-13
-1.56E-07	-6.97E-13
-1.35E-07	-8.54E-13
-1.14E-07	-9.98E-13
-9.22E-08	-1.13E-12
-7.10E-08	-1.25E-12
-4.97E-08	-1.36E-12
-2.84E-08	-1.46E-12
-7.10E-09	-1.56E-12
1.42E-08	-1.64E-12
3.55E-08	-1.72E-12
5.68E-08	-1.79E-12
7.80E-08	-1.86E-12
9.93E-08	-1.93E-12
1.21E-07	-1.99E-12
1.42E-07	-2.04E-12
1.63E-07	-2.10E-12

e=0.7	a=0.7
z	Fz
-2.41E-07	4.93E-13
-2.12E-07	2.86E-13
-1.83E-07	8.71E-14
-1.55E-07	-1.03E-13
-1.26E-07	-2.84E-13
-9.66E-08	-4.53E-13
-6.76E-08	-6.12E-13
-3.86E-08	-7.59E-13
-9.66E-09	-8.96E-13
1.93E-08	-1.02E-12
4.83E-08	-1.14E-12
7.73E-08	-1.24E-12
1.06E-07	-1.34E-12
1.35E-07	-1.43E-12
1.64E-07	-1.51E-12
1.93E-07	-1.58E-12
2.22E-07	-1.64E-12

e=0.7	a=0.8
z	Fz
-3.15E-07	1.25E-12
-2.78E-07	1.02E-12
-2.40E-07	7.94E-13
-2.02E-07	5.72E-13
-1.64E-07	3.57E-13
-1.26E-07	1.50E-13
-8.83E-08	-4.67E-14
-5.05E-08	-2.32E-13
-1.26E-08	-4.06E-13
2.52E-08	-5.68E-13
6.31E-08	-7.17E-13
1.01E-07	-8.53E-13
1.39E-07	-9.76E-13
1.77E-07	-1.09E-12
2.14E-07	-1.18E-12
2.52E-07	-1.26E-12
2.90E-07	-1.33E-12

e=0.7	a=0.9
z	Fz
-3.99E-07	1.80E-12
-3.51E-07	1.55E-12
-3.03E-07	1.30E-12
-2.55E-07	1.05E-12
-2.08E-07	8.11E-13
-1.60E-07	5.74E-13
-1.12E-07	3.46E-13
-6.39E-08	1.29E-13
-1.60E-08	-7.56E-14
3.19E-08	-2.66E-13
7.98E-08	-4.42E-13
1.28E-07	-6.01E-13
1.76E-07	-7.43E-13
2.24E-07	-8.69E-13
2.71E-07	-9.77E-13
3.19E-07	-1.07E-12
3.67E-07	-1.14E-12

e=0.7	a=1.0
z	Fz
-4.93E-07	2.19E-12
-4.34E-07	1.93E-12
-3.74E-07	1.66E-12
-3.15E-07	1.39E-12
-2.56E-07	1.12E-12
-1.97E-07	8.61E-13
-1.38E-07	6.08E-13
-7.88E-08	3.65E-13
-1.97E-08	1.37E-13
3.94E-08	-7.53E-14
9.85E-08	-2.69E-13
1.58E-07	-4.44E-13
2.17E-07	-5.97E-13
2.76E-07	-7.29E-13
3.35E-07	-8.39E-13
3.94E-07	-9.28E-13
4.53E-07	-9.94E-13

e=0.7	a=1.1
z	Fz
-5.96E-07	2.48E-12
-5.25E-07	2.20E-12
-4.53E-07	1.91E-12
-3.82E-07	1.62E-12
-3.10E-07	1.33E-12
-2.38E-07	1.05E-12
-1.67E-07	7.75E-13
-9.54E-08	5.13E-13
-2.38E-08	2.67E-13
4.77E-08	4.12E-14
1.19E-07	-1.63E-13
1.91E-07	-3.43E-13
2.62E-07	-4.98E-13
3.34E-07	-6.26E-13
4.05E-07	-7.28E-13
4.77E-07	-8.02E-13
5.49E-07	-8.51E-13

e=0.7	a=1.2
z	Fz
-7.10E-07	2.69E-12
-6.24E-07	2.40E-12
-5.39E-07	2.09E-12
-4.54E-07	1.78E-12
-3.69E-07	1.47E-12
-2.84E-07	1.17E-12
-1.99E-07	8.77E-13
-1.14E-07	6.00E-13
-2.84E-08	3.43E-13
5.68E-08	1.10E-13
1.42E-07	-9.68E-14
2.27E-07	-2.74E-13
3.12E-07	-4.21E-13
3.97E-07	-5.36E-13
4.82E-07	-6.19E-13
5.68E-07	-6.71E-13
6.53E-07	-6.94E-13

e=0.7	a=1.3
z	Fz
-8.33E-07	2.87E-12
-7.33E-07	2.55E-12
-6.33E-07	2.22E-12
-5.33E-07	1.89E-12
-4.33E-07	1.56E-12
-3.33E-07	1.24E-12
-2.33E-07	9.36E-13
-1.33E-07	6.47E-13
-3.33E-08	3.84E-13
6.66E-08	1.48E-13
1.67E-07	-5.44E-14
2.66E-07	-2.22E-13
3.66E-07	-3.54E-13
4.66E-07	-4.48E-13
5.66E-07	-5.06E-13
6.66E-07	-5.29E-13
7.66E-07	-5.18E-13

e=0.7	a=1.4
z	Fz
-9.66E-07	3.03E-12
-8.50E-07	2.69E-12
-7.34E-07	2.33E-12
-6.18E-07	1.98E-12
-5.02E-07	1.63E-12
-3.86E-07	1.29E-12
-2.70E-07	9.66E-13
-1.55E-07	6.68E-13
-3.86E-08	4.01E-13
7.73E-08	1.68E-13
1.93E-07	-2.61E-14
3.09E-07	-1.79E-13
4.25E-07	-2.89E-13
5.41E-07	-3.58E-13
6.57E-07	-3.85E-13
7.73E-07	-3.75E-13
8.88E-07	-3.29E-13

e=0.7	a=1.5
z	Fz
-1.11E-06	3.19E-12
-9.76E-07	2.81E-12
-8.43E-07	2.43E-12
-7.10E-07	2.05E-12
-5.76E-07	1.67E-12
-4.43E-07	1.32E-12
-3.10E-07	9.79E-13
-1.77E-07	6.73E-13
-4.43E-08	4.03E-13
8.87E-08	1.76E-13
2.22E-07	-6.00E-15
3.55E-07	-1.40E-13
4.88E-07	-2.26E-13
6.21E-07	-2.65E-13
7.54E-07	-2.59E-13
8.87E-07	-2.13E-13
1.02E-06	-1.31E-13

Παράρτημα Β για $\lambda=656$ nm :

- **e=0.1**

a=0.5	e=0.1
z[m]	Fz [N]
-2.00E-07	4.25E-13
-1.76E-07	3.87E-13
-1.52E-07	3.47E-13
-1.28E-07	3.03E-13
-1.04E-07	2.55E-13
-7.99E-08	2.03E-13
-5.59E-08	1.47E-13
-3.20E-08	8.88E-14
-7.99E-09	2.88E-14
1.60E-08	-3.09E-14
4.00E-08	-8.85E-14
6.39E-08	-1.42E-13
8.79E-08	-1.91E-13
1.12E-07	-2.33E-13
1.36E-07	-2.69E-13
1.60E-07	-2.99E-13
1.84E-07	-3.24E-13

a=0.6	e=0.1
z[m]	Fz [N]
-2.88E-07	4.71E-13
-2.53E-07	4.18E-13
-2.19E-07	3.63E-13
-1.84E-07	3.07E-13
-1.50E-07	2.50E-13
-1.15E-07	1.92E-13
-8.06E-08	1.34E-13
-4.60E-08	7.66E-14
-1.15E-08	1.96E-14
2.30E-08	-3.60E-14
5.75E-08	-8.91E-14
9.21E-08	-1.39E-13
1.27E-07	-1.86E-13
1.61E-07	-2.28E-13
1.96E-07	-2.66E-13
2.30E-07	-3.00E-13
2.65E-07	-3.31E-13

a=0.7	e=0.1
z[m]	Fz [N]
-3.92E-07	5.33E-13
-3.45E-07	4.66E-13
-2.98E-07	3.99E-13
-2.51E-07	3.31E-13
-2.04E-07	2.63E-13
-1.57E-07	1.96E-13
-1.10E-07	1.30E-13
-6.27E-08	6.51E-14
-1.57E-08	2.93E-15
3.13E-08	-5.63E-14
7.83E-08	-1.12E-13
1.25E-07	-1.64E-13
1.72E-07	-2.11E-13
2.19E-07	-2.53E-13
2.66E-07	-2.90E-13
3.13E-07	-3.22E-13
3.60E-07	-3.48E-13

a=0.8	e=0.1
z[m]	Fz [N]
-5.11E-07	6.17E-13
-4.50E-07	5.34E-13
-3.89E-07	4.52E-13
-3.27E-07	3.70E-13
-2.66E-07	2.89E-13
-2.05E-07	2.11E-13
-1.43E-07	1.34E-13
-8.18E-08	6.13E-14
-2.05E-08	-7.64E-15
4.09E-08	-7.18E-14
1.02E-07	-1.30E-13
1.64E-07	-1.83E-13
2.25E-07	-2.29E-13
2.86E-07	-2.69E-13
3.48E-07	-3.01E-13
4.09E-07	-3.27E-13
4.71E-07	-3.46E-13

a=0.9	e=0.1
z[m]	Fz [N]
-6.47E-07	7.28E-13
-5.70E-07	6.27E-13
-4.92E-07	5.26E-13
-4.14E-07	4.27E-13
-3.37E-07	3.31E-13
-2.59E-07	2.38E-13
-1.81E-07	1.50E-13
-1.04E-07	6.72E-14
-2.59E-08	-9.38E-15
5.18E-08	-7.87E-14
1.29E-07	-1.40E-13
2.07E-07	-1.93E-13
2.85E-07	-2.38E-13
3.63E-07	-2.73E-13
4.40E-07	-2.99E-13
5.18E-07	-3.16E-13
5.96E-07	-3.25E-13

a=1.0	e=0.1
z[m]	Fz [N]
-7.99E-07	8.61E-13
-7.03E-07	7.39E-13
-6.07E-07	6.18E-13
-5.11E-07	4.99E-13
-4.16E-07	3.85E-13
-3.20E-07	2.76E-13
-2.24E-07	1.74E-13
-1.28E-07	8.01E-14
-3.20E-08	-4.83E-15
6.39E-08	-7.97E-14
1.60E-07	-1.44E-13
2.56E-07	-1.96E-13
3.52E-07	-2.37E-13
4.48E-07	-2.67E-13
5.43E-07	-2.85E-13
6.39E-07	-2.92E-13
7.35E-07	-2.90E-13

a=1.1	e=0.1
z[m]	Fz [N]
-9.67E-07	1.01E-12
-8.51E-07	8.64E-13
-7.35E-07	7.21E-13
-6.19E-07	5.81E-13
-5.03E-07	4.46E-13
-3.87E-07	3.20E-13
-2.71E-07	2.03E-13
-1.55E-07	9.65E-14
-3.87E-08	2.81E-15
7.74E-08	-7.73E-14
1.93E-07	-1.43E-13
3.09E-07	-1.94E-13
4.25E-07	-2.30E-13
5.42E-07	-2.51E-13
6.58E-07	-2.58E-13
7.74E-07	-2.52E-13
8.90E-07	-2.33E-13

a=1.2	e=0.1
z[m]	Fz [N]
-1.15E-06	1.17E-12
-1.01E-06	9.99E-13
-8.75E-07	8.31E-13
-7.37E-07	6.67E-13
-5.98E-07	5.12E-13
-4.60E-07	3.66E-13
-3.22E-07	2.33E-13
-1.84E-07	1.14E-13
-4.60E-08	1.13E-14
9.21E-08	-7.35E-14
2.30E-07	-1.40E-13
3.68E-07	-1.87E-13
5.06E-07	-2.15E-13
6.44E-07	-2.24E-13
7.83E-07	-2.16E-13
9.21E-07	-1.92E-13
1.06E-06	-1.52E-13

a=1.3	e=0.1
z[m]	Fz [N]
-1.35E-06	1.34E-12
-1.19E-06	1.14E-12
-1.03E-06	9.46E-13
-8.64E-07	7.57E-13
-7.02E-07	5.79E-13
-5.40E-07	4.12E-13
-3.78E-07	2.62E-13
-2.16E-07	1.30E-13
-5.40E-08	1.94E-14
1.08E-07	-6.91E-14
2.70E-07	-1.34E-13
4.32E-07	-1.75E-13
5.94E-07	-1.92E-13
7.56E-07	-1.86E-13
9.18E-07	-1.58E-13
1.08E-06	-1.10E-13
1.24E-06	-4.48E-14

a=1.4	e=0.1
z[m]	Fz [N]
-1.57E-06	1.51E-12
-1.38E-06	1.29E-12
-1.19E-06	1.06E-12
-1.00E-06	8.49E-13
-8.15E-07	6.46E-13
-6.27E-07	4.59E-13
-4.39E-07	2.91E-13
-2.51E-07	1.46E-13
-6.27E-08	2.65E-14
1.25E-07	-6.45E-14
3.13E-07	-1.26E-13
5.01E-07	-1.58E-13
6.89E-07	-1.61E-13
8.77E-07	-1.36E-13
1.07E-06	-8.47E-14
1.25E-06	-9.58E-15
1.44E-06	8.68E-14

a=1.5	e=0.1
z[m]	Fz [N]
-1.80E-06	1.69E-12
-1.58E-06	1.44E-12
-1.37E-06	1.19E-12
-1.15E-06	9.43E-13
-9.35E-07	7.14E-13
-7.19E-07	5.04E-13
-5.03E-07	3.18E-13
-2.88E-07	1.59E-13
-7.19E-08	3.26E-14
1.44E-07	-6.01E-14
3.60E-07	-1.17E-13
5.75E-07	-1.38E-13
7.91E-07	-1.24E-13
1.01E-06	-7.64E-14
1.22E-06	2.08E-15
1.44E-06	1.08E-13
1.65E-06	2.39E-13

- e=0.3

a=0.5	e=0.3
z[m]	Fz [N]
-2.00E-07	5.08E-13
-1.76E-07	4.29E-13
-1.52E-07	3.45E-13
-1.28E-07	2.53E-13
-1.04E-07	1.54E-13
-7.99E-08	4.69E-14
-5.59E-08	-6.64E-14
-3.20E-08	-1.84E-13
-7.99E-09	-3.03E-13
1.60E-08	-4.20E-13
4.00E-08	-5.31E-13
6.39E-08	-6.34E-13
8.79E-08	-7.24E-13
1.12E-07	-8.01E-13
1.36E-07	-8.61E-13
1.60E-07	-9.06E-13
1.84E-07	-9.36E-13

a=0.6	e=0.3
z[m]	Fz [N]
-2.88E-07	5.31E-13
-2.53E-07	4.26E-13
-2.19E-07	3.22E-13
-1.84E-07	2.16E-13
-1.50E-07	1.10E-13
-1.15E-07	4.73E-15
-8.06E-08	-9.99E-14
-4.60E-08	-2.02E-13
-1.15E-08	-3.01E-13
2.30E-08	-3.93E-13
5.75E-08	-4.78E-13
9.21E-08	-5.54E-13
1.27E-07	-6.18E-13
1.61E-07	-6.71E-13
1.96E-07	-7.11E-13
2.30E-07	-7.39E-13
2.65E-07	-7.55E-13

a=0.7	e=0.3
z[m]	Fz [N]
-3.92E-07	5.74E-13
-3.45E-07	4.52E-13
-2.98E-07	3.30E-13
-2.51E-07	2.11E-13
-2.04E-07	9.38E-14
-1.57E-07	-1.89E-14
-1.10E-07	-1.26E-13
-6.27E-08	-2.27E-13
-1.57E-08	-3.19E-13
3.13E-08	-4.02E-13
7.83E-08	-4.74E-13
1.25E-07	-5.33E-13
1.72E-07	-5.79E-13
2.19E-07	-6.11E-13
2.66E-07	-6.29E-13
3.13E-07	-6.34E-13
3.60E-07	-6.24E-13

a=0.8	e=0.3
z[m]	Fz [N]
-5.11E-07	6.52E-13
-4.50E-07	5.08E-13
-3.89E-07	3.67E-13
-3.27E-07	2.30E-13
-2.66E-07	9.95E-14
-2.05E-07	-2.37E-14
-1.43E-07	-1.38E-13
-8.18E-08	-2.40E-13
-2.05E-08	-3.30E-13
4.09E-08	-4.05E-13
1.02E-07	-4.65E-13
1.64E-07	-5.09E-13
2.25E-07	-5.35E-13
2.86E-07	-5.43E-13
3.48E-07	-5.35E-13
4.09E-07	-5.09E-13
4.71E-07	-4.67E-13

a=0.9	e=0.3
z[m]	Fz [N]
-6.47E-07	7.89E-13
-5.70E-07	6.16E-13
-4.92E-07	4.48E-13
-4.14E-07	2.88E-13
-3.37E-07	1.37E-13
-2.59E-07	-1.44E-15
-1.81E-07	-1.26E-13
-1.04E-07	-2.33E-13
-2.59E-08	-3.22E-13
5.18E-08	-3.92E-13
1.29E-07	-4.40E-13
2.07E-07	-4.66E-13
2.85E-07	-4.70E-13
3.63E-07	-4.52E-13
4.40E-07	-4.13E-13
5.18E-07	-3.54E-13
5.96E-07	-2.77E-13

a=1.0	e=0.3
z[m]	Fz [N]
-7.99E-07	9.85E-13
-7.03E-07	7.74E-13
-6.07E-07	5.72E-13
-5.11E-07	3.81E-13
-4.16E-07	2.05E-13
-3.20E-07	4.62E-14
-2.24E-07	-9.24E-14
-1.28E-07	-2.08E-13
-3.20E-08	-2.99E-13
6.39E-08	-3.63E-13
1.60E-07	-3.99E-13
2.56E-07	-4.07E-13
3.52E-07	-3.87E-13
4.48E-07	-3.39E-13
5.43E-07	-2.66E-13
6.39E-07	-1.70E-13
7.35E-07	-5.28E-14

a=1.1	e=0.3
z[m]	Fz [N]
-9.67E-07	1.23E-12
-8.51E-07	9.75E-13
-7.35E-07	7.32E-13
-6.19E-07	5.04E-13
-5.03E-07	2.96E-13
-3.87E-07	1.12E-13
-2.71E-07	-4.54E-14
-1.55E-07	-1.72E-13
-3.87E-08	-2.66E-13
7.74E-08	-3.25E-13
1.93E-07	-3.48E-13
3.09E-07	-3.35E-13
4.25E-07	-2.88E-13
5.42E-07	-2.06E-13
6.58E-07	-9.44E-14
7.74E-07	4.53E-14
8.90E-07	2.09E-13

a=1.2	e=0.3
z[m]	Fz [N]
-1.15E-06	1.51E-12
-1.01E-06	1.21E-12
-8.75E-07	9.19E-13
-7.37E-07	6.48E-13
-5.98E-07	4.03E-13
-4.60E-07	1.88E-13
-3.22E-07	8.71E-15
-1.84E-07	-1.32E-13
-4.60E-08	-2.30E-13
9.21E-08	-2.84E-13
2.30E-07	-2.92E-13
3.68E-07	-2.56E-13
5.06E-07	-1.76E-13
6.44E-07	-5.54E-14
7.83E-07	1.02E-13
9.21E-07	2.93E-13
1.06E-06	5.12E-13

a=1.3	e=0.3
z[m]	Fz [N]
-1.35E-06	1.83E-12
-1.19E-06	1.47E-12
-1.03E-06	1.13E-12
-8.64E-07	8.08E-13
-7.02E-07	5.20E-13
-5.40E-07	2.71E-13
-3.78E-07	6.54E-14
-2.16E-07	-9.10E-14
-5.40E-08	-1.94E-13
1.08E-07	-2.43E-13
2.70E-07	-2.34E-13
4.32E-07	-1.71E-13
5.94E-07	-5.42E-14
7.56E-07	1.12E-13
9.18E-07	3.22E-13
1.08E-06	5.72E-13
1.24E-06	8.53E-13

a=1.4	e=0.3
z[m]	Fz [N]
-1.57E-06	2.18E-12
-1.38E-06	1.76E-12
-1.19E-06	1.35E-12
-1.00E-06	9.80E-13
-8.15E-07	6.45E-13
-6.27E-07	3.57E-13
-4.39E-07	1.22E-13
-2.51E-07	-5.24E-14
-6.27E-08	-1.62E-13
1.25E-07	-2.04E-13
3.13E-07	-1.77E-13
5.01E-07	-8.25E-14
6.89E-07	7.58E-14
8.77E-07	2.93E-13
1.07E-06	5.63E-13
1.25E-06	8.77E-13
1.44E-06	1.23E-12

a=1.5	e=0.3
z[m]	Fz [N]
-1.80E-06	2.55E-12
-1.58E-06	2.06E-12
-1.37E-06	1.59E-12
-1.15E-06	1.16E-12
-9.35E-07	7.76E-13
-7.19E-07	4.45E-13
-5.03E-07	1.78E-13
-2.88E-07	-1.67E-14
-7.19E-08	-1.33E-13
1.44E-07	-1.68E-13
3.60E-07	-1.20E-13
5.75E-07	8.02E-15
7.91E-07	2.12E-13
1.01E-06	4.86E-13
1.22E-06	8.20E-13
1.44E-06	1.20E-12
1.65E-06	1.63E-12

- e=0.5**

a=0.5	e=0.5
z[m]	Fz [N]
-2.00E-07	2.62E-13
-1.76E-07	1.46E-13
-1.52E-07	1.95E-14
-1.28E-07	-1.17E-13
-1.04E-07	-2.63E-13
-7.99E-08	-4.16E-13
-5.59E-08	-5.74E-13
-3.20E-08	-7.35E-13
-7.99E-09	-8.96E-13
1.60E-08	-1.05E-12
4.00E-08	-1.21E-12
6.39E-08	-1.35E-12
8.79E-08	-1.49E-12
1.12E-07	-1.61E-12
1.36E-07	-1.72E-12
1.60E-07	-1.81E-12
1.84E-07	-1.89E-12

a=0.6	e=0.5
z[m]	Fz [N]
-2.88E-07	3.37E-13
-2.53E-07	2.19E-13
-2.19E-07	9.33E-14
-1.84E-07	-3.82E-14
-1.50E-07	-1.75E-13
-1.15E-07	-3.17E-13
-8.06E-08	-4.63E-13
-4.60E-08	-6.09E-13
-1.15E-08	-7.55E-13
2.30E-08	-8.98E-13
5.75E-08	-1.03E-12
9.21E-08	-1.16E-12
1.27E-07	-1.28E-12
1.61E-07	-1.39E-12
1.96E-07	-1.48E-12
2.30E-07	-1.56E-12
2.65E-07	-1.63E-12

a=0.7	e=0.5
z[m]	Fz [N]
-3.92E-07	3.47E-13
-3.45E-07	2.37E-13
-2.98E-07	1.19E-13
-2.51E-07	-6.65E-15
-2.04E-07	-1.38E-13
-1.57E-07	-2.74E-13
-1.10E-07	-4.13E-13
-6.27E-08	-5.53E-13
-1.57E-08	-6.91E-13
3.13E-08	-8.27E-13
7.83E-08	-9.57E-13
1.25E-07	-1.08E-12
1.72E-07	-1.19E-12
2.19E-07	-1.30E-12
2.66E-07	-1.39E-12
3.13E-07	-1.47E-12
3.60E-07	-1.54E-12

a=0.8	e=0.5
z[m]	Fz [N]
-5.11E-07	3.31E-13
-4.50E-07	2.32E-13
-3.89E-07	1.23E-13
-3.27E-07	5.24E-15
-2.66E-07	-1.19E-13
-2.05E-07	-2.49E-13
-1.43E-07	-3.83E-13
-8.18E-08	-5.18E-13
-2.05E-08	-6.53E-13
4.09E-08	-7.85E-13
1.02E-07	-9.12E-13
1.64E-07	-1.03E-12
2.25E-07	-1.15E-12
2.86E-07	-1.25E-12
3.48E-07	-1.34E-12
4.09E-07	-1.42E-12
4.71E-07	-1.49E-12

a=0.9	e=0.5
z[m]	Fz [N]
-6.47E-07	3.36E-13
-5.70E-07	2.43E-13
-4.92E-07	1.40E-13
-4.14E-07	2.90E-14
-3.37E-07	-8.98E-14
-2.59E-07	-2.15E-13
-1.81E-07	-3.44E-13
-1.04E-07	-4.76E-13
-2.59E-08	-6.08E-13
5.18E-08	-7.38E-13
1.29E-07	-8.63E-13
2.07E-07	-9.83E-13
2.85E-07	-1.09E-12
3.63E-07	-1.20E-12
4.40E-07	-1.29E-12
5.18E-07	-1.37E-12
5.96E-07	-1.43E-12

a=1.0	e=0.5
z[m]	Fz [N]
-7.99E-07	3.63E-13
-7.03E-07	2.75E-13
-6.07E-07	1.77E-13
-5.11E-07	7.09E-14
-4.16E-07	-4.34E-14
-3.20E-07	-1.64E-13
-2.24E-07	-2.90E-13
-1.28E-07	-4.19E-13
-3.20E-08	-5.48E-13
6.39E-08	-6.75E-13
1.60E-07	-7.99E-13
2.56E-07	-9.17E-13
3.52E-07	-1.03E-12
4.48E-07	-1.13E-12
5.43E-07	-1.22E-12
6.39E-07	-1.29E-12
7.35E-07	-1.36E-12

a=1.1	e=0.5
z[m]	Fz [N]
-9.67E-07	4.00E-13
-8.51E-07	3.17E-13
-7.35E-07	2.24E-13
-6.19E-07	1.23E-13
-5.03E-07	1.26E-14
-3.87E-07	-1.04E-13
-2.71E-07	-2.26E-13
-1.55E-07	-3.51E-13
-3.87E-08	-4.77E-13
7.74E-08	-6.02E-13
1.93E-07	-7.23E-13
3.09E-07	-8.39E-13
4.25E-07	-9.46E-13
5.42E-07	-1.04E-12
6.58E-07	-1.13E-12
7.74E-07	-1.21E-12
8.90E-07	-1.27E-12

a=1.2	e=0.5
z[m]	Fz [N]
-1.15E-06	4.37E-13
-1.01E-06	3.59E-13
-8.75E-07	2.71E-13
-7.37E-07	1.74E-13
-5.98E-07	6.91E-14
-4.60E-07	-4.30E-14
-3.22E-07	-1.61E-13
-1.84E-07	-2.82E-13
-4.60E-08	-4.04E-13
9.21E-08	-5.25E-13
2.30E-07	-6.43E-13
3.68E-07	-7.56E-13
5.06E-07	-8.60E-13
6.44E-07	-9.55E-13
7.83E-07	-1.04E-12
9.21E-07	-1.11E-12
1.06E-06	-1.17E-12

a=1.3	e=0.5
z[m]	Fz [N]
-1.35E-06	4.69E-13
-1.19E-06	3.95E-13
-1.03E-06	3.12E-13
-8.64E-07	2.20E-13
-7.02E-07	1.20E-13
-5.40E-07	1.30E-14
-3.78E-07	-9.96E-14
-2.16E-07	-2.16E-13
-5.40E-08	-3.34E-13
1.08E-07	-4.51E-13
2.70E-07	-5.65E-13
4.32E-07	-6.74E-13
5.94E-07	-7.76E-13
7.56E-07	-8.68E-13
9.18E-07	-9.50E-13
1.08E-06	-1.02E-12
1.24E-06	-1.08E-12

a=1.4	e=0.5
z[m]	Fz [N]
-1.57E-06	4.92E-13
-1.38E-06	4.23E-13
-1.19E-06	3.44E-13
-1.00E-06	2.57E-13
-8.15E-07	1.63E-13
-6.27E-07	6.08E-14
-4.39E-07	-4.66E-14
-2.51E-07	-1.58E-13
-6.27E-08	-2.71E-13
1.25E-07	-3.84E-13
3.13E-07	-4.94E-13
5.01E-07	-5.99E-13
6.89E-07	-6.97E-13
8.77E-07	-7.88E-13
1.07E-06	-8.68E-13
1.25E-06	-9.38E-13
1.44E-06	-9.97E-13

a=1.5	e=0.5
z[m]	Fz [N]
-1.80E-06	5.08E-13
-1.58E-06	4.42E-13
-1.37E-06	3.68E-13
-1.15E-06	2.86E-13
-9.35E-07	1.96E-13
-7.19E-07	9.94E-14
-5.03E-07	-2.50E-15
-2.88E-07	-1.08E-13
-7.19E-08	-2.16E-13
1.44E-07	-3.24E-13
3.60E-07	-4.30E-13
5.75E-07	-5.32E-13
7.91E-07	-6.27E-13
1.01E-06	-7.16E-13
1.22E-06	-7.95E-13
1.44E-06	-8.65E-13
1.65E-06	-9.25E-13

- e=0.7

a=0.5	e=0.7
z[m]	Fz [N]
-2.00E-07	2.68E-13
-1.76E-07	9.93E-14
-1.52E-07	-7.45E-14
-1.28E-07	-2.52E-13
-1.04E-07	-4.31E-13
-7.99E-08	-6.10E-13
-5.59E-08	-7.88E-13
-3.20E-08	-9.62E-13
-7.99E-09	-1.13E-12
1.60E-08	-1.30E-12
4.00E-08	-1.45E-12
6.39E-08	-1.60E-12
8.79E-08	-1.73E-12
1.12E-07	-1.85E-12
1.36E-07	-1.96E-12
1.60E-07	-2.05E-12
1.84E-07	-2.13E-12

a=0.6	e=0.7
z[m]	Fz [N]
-2.88E-07	4.95E-13
-2.53E-07	3.17E-13
-2.19E-07	1.36E-13
-1.84E-07	-4.86E-14
-1.50E-07	-2.34E-13
-1.15E-07	-4.19E-13
-8.06E-08	-6.02E-13
-4.60E-08	-7.79E-13
-1.15E-08	-9.50E-13
2.30E-08	-1.11E-12
5.75E-08	-1.26E-12
9.21E-08	-1.40E-12
1.27E-07	-1.52E-12
1.61E-07	-1.62E-12
1.96E-07	-1.71E-12
2.30E-07	-1.78E-12
2.65E-07	-1.83E-12

a=0.7	e=0.7
z[m]	Fz [N]
-3.92E-07	5.83E-13
-3.45E-07	4.05E-13
-2.98E-07	2.20E-13
-2.51E-07	3.24E-14
-2.04E-07	-1.57E-13
-1.57E-07	-3.45E-13
-1.10E-07	-5.29E-13
-6.27E-08	-7.06E-13
-1.57E-08	-8.75E-13
3.13E-08	-1.03E-12
7.83E-08	-1.17E-12
1.25E-07	-1.30E-12
1.72E-07	-1.41E-12
2.19E-07	-1.51E-12
2.66E-07	-1.58E-12
3.13E-07	-1.64E-12
3.60E-07	-1.68E-12

a=0.8	e=0.7
z[m]	Fz [N]
-5.11E-07	6.36E-13
-4.50E-07	4.56E-13
-3.89E-07	2.69E-13
-3.27E-07	7.74E-14
-2.66E-07	-1.15E-13
-2.05E-07	-3.05E-13
-1.43E-07	-4.91E-13
-8.18E-08	-6.69E-13
-2.05E-08	-8.35E-13
4.09E-08	-9.88E-13
1.02E-07	-1.12E-12
1.64E-07	-1.24E-12
2.25E-07	-1.34E-12
2.86E-07	-1.42E-12
3.48E-07	-1.48E-12
4.09E-07	-1.52E-12
4.71E-07	-1.54E-12

a=0.9	e=0.7
z[m]	Fz [N]
-6.47E-07	7.35E-13
-5.70E-07	5.43E-13
-4.92E-07	3.45E-13
-4.14E-07	1.44E-13
-3.37E-07	-5.63E-14
-2.59E-07	-2.53E-13
-1.81E-07	-4.42E-13
-1.04E-07	-6.21E-13
-2.59E-08	-7.86E-13
5.18E-08	-9.34E-13
1.29E-07	-1.06E-12
2.07E-07	-1.17E-12
2.85E-07	-1.25E-12
3.63E-07	-1.31E-12
4.40E-07	-1.35E-12
5.18E-07	-1.36E-12
5.96E-07	-1.35E-12

a=1.0	e=0.7
z[m]	Fz [N]
-7.99E-07	8.90E-13
-7.03E-07	6.79E-13
-6.07E-07	4.63E-13
-5.11E-07	2.47E-13
-4.16E-07	3.37E-14
-3.20E-07	-1.73E-13
-2.24E-07	-3.69E-13
-1.28E-07	-5.51E-13
-3.20E-08	-7.15E-13
6.39E-08	-8.57E-13
1.60E-07	-9.75E-13
2.56E-07	-1.07E-12
3.52E-07	-1.13E-12
4.48E-07	-1.17E-12
5.43E-07	-1.18E-12
6.39E-07	-1.16E-12
7.35E-07	-1.11E-12

a=1.1	e=0.7
z[m]	Fz [N]
-9.67E-07	1.08E-12
-8.51E-07	8.49E-13
-7.35E-07	6.12E-13
-6.19E-07	3.77E-13
-5.03E-07	1.47E-13
-3.87E-07	-7.26E-14
-2.71E-07	-2.78E-13
-1.55E-07	-4.64E-13
-3.87E-08	-6.26E-13
7.74E-08	-7.62E-13
1.93E-07	-8.68E-13
3.09E-07	-9.43E-13
4.25E-07	-9.84E-13
5.42E-07	-9.93E-13
6.58E-07	-9.71E-13
7.74E-07	-9.18E-13
8.90E-07	-8.37E-13

a=1.2	e=0.7
z[m]	Fz [N]
-1.15E-06	1.30E-12
-1.01E-06	1.04E-12
-8.75E-07	7.77E-13
-7.37E-07	5.20E-13
-5.98E-07	2.71E-13
-4.60E-07	3.66E-14
-3.22E-07	-1.79E-13
-1.84E-07	-3.70E-13
-4.60E-08	-5.31E-13
9.21E-08	-6.60E-13
2.30E-07	-7.53E-13
3.68E-07	-8.09E-13
5.06E-07	-8.26E-13
6.44E-07	-8.07E-13
7.83E-07	-7.52E-13
9.21E-07	-6.64E-13
1.06E-06	-5.48E-13

a=1.3	e=0.7
z[m]	Fz [N]
-1.35E-06	1.53E-12
-1.19E-06	1.24E-12
-1.03E-06	9.48E-13
-8.64E-07	6.67E-13
-7.02E-07	3.97E-13
-5.40E-07	1.46E-13
-3.78E-07	-8.13E-14
-2.16E-07	-2.78E-13
-5.40E-08	-4.39E-13
1.08E-07	-5.61E-13
2.70E-07	-6.40E-13
4.32E-07	-6.76E-13
5.94E-07	-6.68E-13
7.56E-07	-6.20E-13
9.18E-07	-5.32E-13
1.08E-06	-4.11E-13
1.24E-06	-2.61E-13

a=1.4	e=0.7
z[m]	Fz [N]
-1.57E-06	1.76E-12
-1.38E-06	1.44E-12
-1.19E-06	1.12E-12
-1.00E-06	8.11E-13
-8.15E-07	5.19E-13
-6.27E-07	2.49E-13
-4.39E-07	9.28E-15
-2.51E-07	-1.94E-13
-6.27E-08	-3.55E-13
1.25E-07	-4.69E-13
3.13E-07	-5.35E-13
5.01E-07	-5.50E-13
6.89E-07	-5.18E-13
8.77E-07	-4.40E-13
1.07E-06	-3.21E-13
1.25E-06	-1.67E-13
1.44E-06	1.47E-14

a=1.5	e=0.7
z[m]	Fz [N]
-1.80E-06	1.99E-12
-1.58E-06	1.64E-12
-1.37E-06	1.29E-12
-1.15E-06	9.52E-13
-9.35E-07	6.35E-13
-7.19E-07	3.45E-13
-5.03E-07	9.08E-14
-2.88E-07	-1.20E-13
-7.19E-08	-2.81E-13
1.44E-07	-3.89E-13
3.60E-07	-4.40E-13
5.75E-07	-4.35E-13
7.91E-07	-3.77E-13
1.01E-06	-2.70E-13
1.22E-06	-1.20E-13
1.44E-06	6.58E-14
1.65E-06	2.78E-13

- e=0.9

a=0.5	e=0.9
z[m]	Fz [N]
-2.00E-07	1.64E-13
-1.76E-07	2.86E-15
-1.52E-07	-1.61E-13
-1.28E-07	-3.25E-13
-1.04E-07	-4.90E-13
-7.99E-08	-6.54E-13
-5.59E-08	-8.15E-13
-3.20E-08	-9.75E-13
-7.99E-09	-1.13E-12
1.60E-08	-1.28E-12
4.00E-08	-1.43E-12
6.39E-08	-1.57E-12
8.79E-08	-1.70E-12
1.12E-07	-1.82E-12
1.36E-07	-1.94E-12
1.60E-07	-2.05E-12
1.84E-07	-2.14E-12

a=0.6	e=0.9
z[m]	Fz [N]
-2.88E-07	4.48E-13
-2.53E-07	2.82E-13
-2.19E-07	1.11E-13
-1.84E-07	-6.46E-14
-1.50E-07	-2.43E-13
-1.15E-07	-4.22E-13
-8.06E-08	-6.01E-13
-4.60E-08	-7.78E-13
-1.15E-08	-9.52E-13
2.30E-08	-1.12E-12
5.75E-08	-1.28E-12
9.21E-08	-1.43E-12
1.27E-07	-1.58E-12
1.61E-07	-1.71E-12
1.96E-07	-1.83E-12
2.30E-07	-1.94E-12
2.65E-07	-2.03E-12

a=0.7	e=0.9
z[m]	Fz [N]
-3.92E-07	4.89E-13
-3.45E-07	3.34E-13
-2.98E-07	1.69E-13
-2.51E-07	-2.46E-15
-2.04E-07	-1.80E-13
-1.57E-07	-3.61E-13
-1.10E-07	-5.43E-13
-6.27E-08	-7.24E-13
-1.57E-08	-9.03E-13
3.13E-08	-1.08E-12
7.83E-08	-1.24E-12
1.25E-07	-1.40E-12
1.72E-07	-1.55E-12
2.19E-07	-1.69E-12
2.66E-07	-1.81E-12
3.13E-07	-1.93E-12
3.60E-07	-2.03E-12

a=0.8	e=0.9
z[m]	Fz [N]
-5.11E-07	4.41E-13
-4.50E-07	3.02E-13
-3.89E-07	1.50E-13
-3.27E-07	-1.13E-14
-2.66E-07	-1.81E-13
-2.05E-07	-3.57E-13
-1.43E-07	-5.37E-13
-8.18E-08	-7.17E-13
-2.05E-08	-8.95E-13
4.09E-08	-1.07E-12
1.02E-07	-1.24E-12
1.64E-07	-1.40E-12
2.25E-07	-1.54E-12
2.86E-07	-1.68E-12
3.48E-07	-1.80E-12
4.09E-07	-1.91E-12
4.71E-07	-2.01E-12

a=0.9	e=0.9
z[m]	Fz [N]
-6.47E-07	4.11E-13
-5.70E-07	2.82E-13
-4.92E-07	1.40E-13
-4.14E-07	-1.33E-14
-3.37E-07	-1.76E-13
-2.59E-07	-3.46E-13
-1.81E-07	-5.21E-13
-1.04E-07	-6.97E-13
-2.59E-08	-8.72E-13
5.18E-08	-1.04E-12
1.29E-07	-1.21E-12
2.07E-07	-1.36E-12
2.85E-07	-1.50E-12
3.63E-07	-1.63E-12
4.40E-07	-1.75E-12
5.18E-07	-1.85E-12
5.96E-07	-1.93E-12

a=1.0	e=0.9
z[m]	Fz [N]
-7.99E-07	4.23E-13
-7.03E-07	2.99E-13
-6.07E-07	1.63E-13
-5.11E-07	1.56E-14
-4.16E-07	-1.42E-13
-3.20E-07	-3.07E-13
-2.24E-07	-4.76E-13
-1.28E-07	-6.48E-13
-3.20E-08	-8.18E-13
6.39E-08	-9.83E-13
1.60E-07	-1.14E-12
2.56E-07	-1.29E-12
3.52E-07	-1.42E-12
4.48E-07	-1.54E-12
5.43E-07	-1.65E-12
6.39E-07	-1.73E-12
7.35E-07	-1.80E-12

a=1.1	e=0.9
z[m]	Fz [N]
-9.67E-07	4.62E-13
-8.51E-07	3.43E-13
-7.35E-07	2.11E-13
-6.19E-07	6.82E-14
-5.03E-07	-8.44E-14
-3.87E-07	-2.44E-13
-2.71E-07	-4.09E-13
-1.55E-07	-5.75E-13
-3.87E-08	-7.39E-13
7.74E-08	-8.98E-13
1.93E-07	-1.05E-12
3.09E-07	-1.19E-12
4.25E-07	-1.31E-12
5.42E-07	-1.42E-12
6.58E-07	-1.51E-12
7.74E-07	-1.59E-12
8.90E-07	-1.64E-12

a=1.2	e=0.9
z[m]	Fz [N]
-1.15E-06	5.12E-13
-1.01E-06	3.96E-13
-8.75E-07	2.69E-13
-7.37E-07	1.30E-13
-5.98E-07	-1.77E-14
-4.60E-07	-1.72E-13
-3.22E-07	-3.31E-13
-1.84E-07	-4.90E-13
-4.60E-08	-6.47E-13
9.21E-08	-7.98E-13
2.30E-07	-9.40E-13
3.68E-07	-1.07E-12
5.06E-07	-1.19E-12
6.44E-07	-1.28E-12
7.83E-07	-1.37E-12
9.21E-07	-1.43E-12
1.06E-06	-1.47E-12

a=1.3	e=0.9
z[m]	Fz [N]
-1.35E-06	5.61E-13
-1.19E-06	4.48E-13
-1.03E-06	3.24E-13
-8.64E-07	1.90E-13
-7.02E-07	4.75E-14
-5.40E-07	-1.01E-13
-3.78E-07	-2.53E-13
-2.16E-07	-4.05E-13
-5.40E-08	-5.53E-13
1.08E-07	-6.95E-13
2.70E-07	-8.28E-13
4.32E-07	-9.48E-13
5.94E-07	-1.05E-12
7.56E-07	-1.14E-12
9.18E-07	-1.21E-12
1.08E-06	-1.27E-12
1.24E-06	-1.30E-12

a=1.4	e=0.9
z[m]	Fz [N]
-1.57E-06	6.02E-13
-1.38E-06	4.92E-13
-1.19E-06	3.71E-13
-1.00E-06	2.42E-13
-8.15E-07	1.05E-13
-6.27E-07	-3.72E-14
-4.39E-07	-1.82E-13
-2.51E-07	-3.25E-13
-6.27E-08	-4.65E-13
1.25E-07	-5.97E-13
3.13E-07	-7.19E-13
5.01E-07	-8.29E-13
6.89E-07	-9.24E-13
8.77E-07	-1.00E-12
1.07E-06	-1.07E-12
1.25E-06	-1.11E-12
1.44E-06	-1.15E-12

a=1.5	e=0.9
z[m]	Fz [N]
-1.80E-06	6.32E-13
-1.58E-06	5.24E-13
-1.37E-06	4.07E-13
-1.15E-06	2.82E-13
-9.35E-07	1.51E-13
-7.19E-07	1.61E-14
-5.03E-07	-1.20E-13
-2.88E-07	-2.55E-13
-7.19E-08	-3.85E-13
1.44E-07	-5.08E-13
3.60E-07	-6.20E-13
5.75E-07	-7.19E-13
7.91E-07	-8.05E-13
1.01E-06	-8.75E-13
1.22E-06	-9.32E-13
1.44E-06	-9.74E-13
1.65E-06	-1.00E-12

- e=1.0

a=0.5	e=1.0
z[m]	Fz [N]
-2.00E-07	4.14E-13
-1.76E-07	2.57E-13
-1.52E-07	9.93E-14
-1.28E-07	-5.90E-14
-1.04E-07	-2.17E-13
-7.99E-08	-3.74E-13
-5.59E-08	-5.30E-13
-3.20E-08	-6.83E-13
-7.99E-09	-8.34E-13
1.60E-08	-9.82E-13
4.00E-08	-1.13E-12
6.39E-08	-1.27E-12
8.79E-08	-1.40E-12
1.12E-07	-1.53E-12
1.36E-07	-1.65E-12
1.60E-07	-1.77E-12
1.84E-07	-1.89E-12

a=0.6	e=1.0
z[m]	Fz [N]
-2.88E-07	7.27E-13
-2.53E-07	5.58E-13
-2.19E-07	3.83E-13
-1.84E-07	2.04E-13
-1.50E-07	2.14E-14
-1.15E-07	-1.63E-13
-8.06E-08	-3.49E-13
-4.60E-08	-5.34E-13
-1.15E-08	-7.17E-13
2.30E-08	-8.98E-13
5.75E-08	-1.07E-12
9.21E-08	-1.24E-12
1.27E-07	-1.41E-12
1.61E-07	-1.57E-12
1.96E-07	-1.72E-12
2.30E-07	-1.86E-12
2.65E-07	-1.99E-12

a=0.7	e=1.0
z[m]	Fz [N]
-3.92E-07	7.80E-13
-3.45E-07	6.18E-13
-2.98E-07	4.46E-13
-2.51E-07	2.64E-13
-2.04E-07	7.50E-14
-1.57E-07	-1.20E-13
-1.10E-07	-3.18E-13
-6.27E-08	-5.18E-13
-1.57E-08	-7.18E-13
3.13E-08	-9.16E-13
7.83E-08	-1.11E-12
1.25E-07	-1.30E-12
1.72E-07	-1.48E-12
2.19E-07	-1.66E-12
2.66E-07	-1.82E-12
3.13E-07	-1.98E-12
3.60E-07	-2.12E-12

a=0.8	e=1.0
z[m]	Fz [N]
-5.11E-07	7.36E-13
-4.50E-07	5.89E-13
-3.89E-07	4.27E-13
-3.27E-07	2.52E-13
-2.66E-07	6.58E-14
-2.05E-07	-1.29E-13
-1.43E-07	-3.31E-13
-8.18E-08	-5.37E-13
-2.05E-08	-7.45E-13
4.09E-08	-9.51E-13
1.02E-07	-1.15E-12
1.64E-07	-1.35E-12
2.25E-07	-1.54E-12
2.86E-07	-1.72E-12
3.48E-07	-1.89E-12
4.09E-07	-2.05E-12
4.71E-07	-2.19E-12

a=0.9	e=1.0
z[m]	Fz [N]
-6.47E-07	7.04E-13
-5.70E-07	5.68E-13
-4.92E-07	4.15E-13
-4.14E-07	2.47E-13
-3.37E-07	6.54E-14
-2.59E-07	-1.27E-13
-1.81E-07	-3.29E-13
-1.04E-07	-5.36E-13
-2.59E-08	-7.46E-13
5.18E-08	-9.55E-13
1.29E-07	-1.16E-12
2.07E-07	-1.36E-12
2.85E-07	-1.55E-12
3.63E-07	-1.73E-12
4.40E-07	-1.90E-12
5.18E-07	-2.05E-12
5.96E-07	-2.18E-12

a=1.0	e=1.0
z[m]	Fz [N]
-7.99E-07	7.10E-13
-7.03E-07	5.81E-13
-6.07E-07	4.35E-13
-5.11E-07	2.72E-13
-4.16E-07	9.51E-14
-3.20E-07	-9.43E-14
-2.24E-07	-2.94E-13
-1.28E-07	-5.00E-13
-3.20E-08	-7.09E-13
6.39E-08	-9.19E-13
1.60E-07	-1.12E-12
2.56E-07	-1.32E-12
3.52E-07	-1.51E-12
4.48E-07	-1.69E-12
5.43E-07	-1.85E-12
6.39E-07	-2.00E-12
7.35E-07	-2.12E-12

a=1.1	e=1.0
z[m]	Fz [N]
-9.67E-07	7.37E-13
-8.51E-07	6.15E-13
-7.35E-07	4.76E-13
-6.19E-07	3.19E-13
-5.03E-07	1.47E-13
-3.87E-07	-3.77E-14
-2.71E-07	-2.33E-13
-1.55E-07	-4.36E-13
-3.87E-08	-6.43E-13
7.74E-08	-8.50E-13
1.93E-07	-1.05E-12
3.09E-07	-1.25E-12
4.25E-07	-1.44E-12
5.42E-07	-1.61E-12
6.58E-07	-1.77E-12
7.74E-07	-1.91E-12
8.90E-07	-2.03E-12

a=1.2	e=1.0
z[m]	Fz [N]
-1.15E-06	7.68E-13
-1.01E-06	6.54E-13
-8.75E-07	5.22E-13
-7.37E-07	3.72E-13
-5.98E-07	2.07E-13
-4.60E-07	2.84E-14
-3.22E-07	-1.62E-13
-1.84E-07	-3.59E-13
-4.60E-08	-5.62E-13
9.21E-08	-7.64E-13
2.30E-07	-9.63E-13
3.68E-07	-1.16E-12
5.06E-07	-1.34E-12
6.44E-07	-1.51E-12
7.83E-07	-1.66E-12
9.21E-07	-1.79E-12
1.06E-06	-1.91E-12

a=1.3	e=1.0
z[m]	Fz [N]
-1.35E-06	7.91E-13
-1.19E-06	6.84E-13
-1.03E-06	5.61E-13
-8.64E-07	4.20E-13
-7.02E-07	2.63E-13
-5.40E-07	9.23E-14
-3.78E-07	-9.00E-14
-2.16E-07	-2.81E-13
-5.40E-08	-4.76E-13
1.08E-07	-6.72E-13
2.70E-07	-8.65E-13
4.32E-07	-1.05E-12
5.94E-07	-1.23E-12
7.56E-07	-1.39E-12
9.18E-07	-1.54E-12
1.08E-06	-1.67E-12
1.24E-06	-1.79E-12

a=1.4	e=1.0
z[m]	Fz [N]
-1.57E-06	7.99E-13
-1.38E-06	7.01E-13
-1.19E-06	5.86E-13
-1.00E-06	4.55E-13
-8.15E-07	3.08E-13
-6.27E-07	1.47E-13
-4.39E-07	-2.57E-14
-2.51E-07	-2.07E-13
-6.27E-08	-3.94E-13
1.25E-07	-5.82E-13
3.13E-07	-7.67E-13
5.01E-07	-9.47E-13
6.89E-07	-1.12E-12
8.77E-07	-1.28E-12
1.07E-06	-1.42E-12
1.25E-06	-1.55E-12
1.44E-06	-1.66E-12

a=1.5	e=1.0
z[m]	Fz [N]
-1.80E-06	7.90E-13
-1.58E-06	7.02E-13
-1.37E-06	5.97E-13
-1.15E-06	4.76E-13
-9.35E-07	3.40E-13
-7.19E-07	1.90E-13
-5.03E-07	2.77E-14
-2.88E-07	-1.43E-13
-7.19E-08	-3.20E-13
1.44E-07	-4.98E-13
3.60E-07	-6.75E-13
5.75E-07	-8.47E-13
7.91E-07	-1.01E-12
1.01E-06	-1.16E-12
1.22E-06	-1.31E-12
1.44E-06	-1.43E-12
1.65E-06	-1.55E-12

- e=1.1

a=0.5	e=1.1
z[m]	Fz [N]
-2.00E-07	4.09E-13
-1.76E-07	2.49E-13
-1.52E-07	8.82E-14
-1.28E-07	-7.08E-14
-1.04E-07	-2.28E-13
-7.99E-08	-3.82E-13
-5.59E-08	-5.33E-13
-3.20E-08	-6.81E-13
-7.99E-09	-8.24E-13
1.60E-08	-9.63E-13
4.00E-08	-1.10E-12
6.39E-08	-1.23E-12
8.79E-08	-1.35E-12
1.12E-07	-1.47E-12
1.36E-07	-1.59E-12
1.60E-07	-1.70E-12
1.84E-07	-1.81E-12

a=0.6	e=1.1
z[m]	Fz [N]
-2.88E-07	7.45E-13
-2.53E-07	5.63E-13
-2.19E-07	3.78E-13
-1.84E-07	1.89E-13
-1.50E-07	-1.93E-15
-1.15E-07	-1.93E-13
-8.06E-08	-3.84E-13
-4.60E-08	-5.73E-13
-1.15E-08	-7.58E-13
2.30E-08	-9.40E-13
5.75E-08	-1.12E-12
9.21E-08	-1.29E-12
1.27E-07	-1.46E-12
1.61E-07	-1.62E-12
1.96E-07	-1.77E-12
2.30E-07	-1.91E-12
2.65E-07	-2.05E-12

a=0.7	e=1.1
z[m]	Fz [N]
-3.92E-07	8.24E-13
-3.45E-07	6.44E-13
-2.98E-07	4.53E-13
-2.51E-07	2.54E-13
-2.04E-07	4.92E-14
-1.57E-07	-1.60E-13
-1.10E-07	-3.72E-13
-6.27E-08	-5.84E-13
-1.57E-08	-7.94E-13
3.13E-08	-1.00E-12
7.83E-08	-1.20E-12
1.25E-07	-1.40E-12
1.72E-07	-1.59E-12
2.19E-07	-1.77E-12
2.66E-07	-1.94E-12
3.13E-07	-2.11E-12
3.60E-07	-2.26E-12

a=0.8	e=1.1
z[m]	Fz [N]
-5.11E-07	8.17E-13
-4.50E-07	6.45E-13
-3.89E-07	4.59E-13
-3.27E-07	2.60E-13
-2.66E-07	5.08E-14
-2.05E-07	-1.66E-13
-1.43E-07	-3.88E-13
-8.18E-08	-6.12E-13
-2.05E-08	-8.36E-13
4.09E-08	-1.06E-12
1.02E-07	-1.27E-12
1.64E-07	-1.48E-12
2.25E-07	-1.68E-12
2.86E-07	-1.87E-12
3.48E-07	-2.05E-12
4.09E-07	-2.21E-12
4.71E-07	-2.36E-12

a=0.9	e=1.1
z[m]	Fz [N]
-6.47E-07	8.29E-13
-5.70E-07	6.62E-13
-4.92E-07	4.79E-13
-4.14E-07	2.81E-13
-3.37E-07	7.11E-14
-2.59E-07	-1.49E-13
-1.81E-07	-3.76E-13
-1.04E-07	-6.07E-13
-2.59E-08	-8.38E-13
5.18E-08	-1.07E-12
1.29E-07	-1.29E-12
2.07E-07	-1.50E-12
2.85E-07	-1.71E-12
3.63E-07	-1.89E-12
4.40E-07	-2.07E-12
5.18E-07	-2.22E-12
5.96E-07	-2.35E-12

a=1.0	e=1.1
z[m]	Fz [N]
-7.99E-07	8.81E-13
-7.03E-07	7.17E-13
-6.07E-07	5.35E-13
-5.11E-07	3.38E-13
-4.16E-07	1.27E-13
-3.20E-07	-9.53E-14
-2.24E-07	-3.25E-13
-1.28E-07	-5.59E-13
-3.20E-08	-7.94E-13
6.39E-08	-1.03E-12
1.60E-07	-1.25E-12
2.56E-07	-1.46E-12
3.52E-07	-1.66E-12
4.48E-07	-1.85E-12
5.43E-07	-2.02E-12
6.39E-07	-2.16E-12
7.35E-07	-2.29E-12

a=1.1	e=1.1
z[m]	Fz [N]
-9.67E-07	9.53E-13
-8.51E-07	7.92E-13
-7.35E-07	6.13E-13
-6.19E-07	4.17E-13
-5.03E-07	2.06E-13
-3.87E-07	-1.58E-14
-2.71E-07	-2.46E-13
-1.55E-07	-4.81E-13
-3.87E-08	-7.16E-13
7.74E-08	-9.47E-13
1.93E-07	-1.17E-12
3.09E-07	-1.38E-12
4.25E-07	-1.58E-12
5.42E-07	-1.76E-12
6.58E-07	-1.92E-12
7.74E-07	-2.06E-12
8.90E-07	-2.18E-12

a=1.2	e=1.1
z[m]	Fz [N]
-1.15E-06	1.03E-12
-1.01E-06	8.69E-13
-8.75E-07	6.93E-13
-7.37E-07	5.00E-13
-5.98E-07	2.92E-13
-4.60E-07	7.23E-14
-3.22E-07	-1.56E-13
-1.84E-07	-3.89E-13
-4.60E-08	-6.21E-13
9.21E-08	-8.50E-13
2.30E-07	-1.07E-12
3.68E-07	-1.28E-12
5.06E-07	-1.47E-12
6.44E-07	-1.65E-12
7.83E-07	-1.80E-12
9.21E-07	-1.94E-12
1.06E-06	-2.05E-12

a=1.3	e=1.1
z[m3]	Fz [N]
-1.35E-06	1.09E-12
-1.19E-06	9.33E-13
-1.03E-06	7.62E-13
-8.64E-07	5.74E-13
-7.02E-07	3.71E-13
-5.40E-07	1.56E-13
-3.78E-07	-6.77E-14
-2.16E-07	-2.95E-13
-5.40E-08	-5.23E-13
1.08E-07	-7.46E-13
2.70E-07	-9.60E-13
4.32E-07	-1.16E-12
5.94E-07	-1.35E-12
7.56E-07	-1.52E-12
9.18E-07	-1.66E-12
1.08E-06	-1.79E-12
1.24E-06	-1.90E-12

a=1.4	e=1.1
z[m3]	Fz [N]
-1.57E-06	1.13E-12
-1.38E-06	9.81E-13
-1.19E-06	8.15E-13
-1.00E-06	6.33E-13
-8.15E-07	4.36E-13
-6.27E-07	2.27E-13
-4.39E-07	1.07E-14
-2.51E-07	-2.10E-13
-6.27E-08	-4.30E-13
1.25E-07	-6.45E-13
3.13E-07	-8.51E-13
5.01E-07	-1.04E-12
6.89E-07	-1.22E-12
8.77E-07	-1.38E-12
1.07E-06	-1.52E-12
1.25E-06	-1.65E-12
1.44E-06	-1.75E-12

a=1.5	e=1.1
z[m3]	Fz [N]
-1.80E-06	1.15E-12
-1.58E-06	1.01E-12
-1.37E-06	8.49E-13
-1.15E-06	6.74E-13
-9.35E-07	4.84E-13
-7.19E-07	2.84E-13
-5.03E-07	7.58E-14
-2.88E-07	-1.36E-13
-7.19E-08	-3.46E-13
1.44E-07	-5.52E-13
3.60E-07	-7.49E-13
5.75E-07	-9.33E-13
7.91E-07	-1.10E-12
1.01E-06	-1.25E-12
1.22E-06	-1.39E-12
1.44E-06	-1.50E-12
1.65E-06	-1.60E-12

- e=1.2

a=0.5	e=1.2
z[m]	Fz [N]
-2.00E-07	1.68E-13
-1.76E-07	5.60E-15
-1.52E-07	-1.55E-13
-1.28E-07	-3.12E-13
-1.04E-07	-4.66E-13
-7.99E-08	-6.15E-13
-5.59E-08	-7.60E-13
-3.20E-08	-8.99E-13
-7.99E-09	-1.03E-12
1.60E-08	-1.16E-12
4.00E-08	-1.28E-12
6.39E-08	-1.40E-12
8.79E-08	-1.51E-12
1.12E-07	-1.62E-12
1.36E-07	-1.73E-12
1.60E-07	-1.83E-12
1.84E-07	-1.92E-12

a=0.6	e=1.2
z[m]	Fz [N]
-2.88E-07	5.72E-13
-2.53E-07	3.82E-13
-2.19E-07	1.91E-13
-1.84E-07	-2.89E-15
-1.50E-07	-1.96E-13
-1.15E-07	-3.89E-13
-8.06E-08	-5.78E-13
-4.60E-08	-7.65E-13
-1.15E-08	-9.46E-13
2.30E-08	-1.12E-12
5.75E-08	-1.29E-12
9.21E-08	-1.46E-12
1.27E-07	-1.62E-12
1.61E-07	-1.77E-12
1.96E-07	-1.92E-12
2.30E-07	-2.06E-12
2.65E-07	-2.20E-12

a=0.7	e=1.2
z[m]	Fz [N]
-3.92E-07	6.94E-13
-3.45E-07	5.03E-13
-2.98E-07	3.04E-13
-2.51E-07	9.66E-14
-2.04E-07	-1.15E-13
-1.57E-07	-3.30E-13
-1.10E-07	-5.45E-13
-6.27E-08	-7.59E-13
-1.57E-08	-9.70E-13
3.13E-08	-1.18E-12
7.83E-08	-1.38E-12
1.25E-07	-1.57E-12
1.72E-07	-1.76E-12
2.19E-07	-1.94E-12
2.66E-07	-2.11E-12
3.13E-07	-2.27E-12
3.60E-07	-2.42E-12

a=0.8	e=1.2
z[m]	Fz [N]
-5.11E-07	7.15E-13
-4.50E-07	5.32E-13
-3.89E-07	3.36E-13
-3.27E-07	1.27E-13
-2.66E-07	-9.14E-14
-2.05E-07	-3.16E-13
-1.43E-07	-5.45E-13
-8.18E-08	-7.74E-13
-2.05E-08	-1.00E-12
4.09E-08	-1.23E-12
1.02E-07	-1.45E-12
1.64E-07	-1.66E-12
2.25E-07	-1.86E-12
2.86E-07	-2.04E-12
3.48E-07	-2.22E-12
4.09E-07	-2.38E-12
4.71E-07	-2.53E-12

a=0.9	e=1.2
z[m]	Fz [N]
-6.47E-07	7.49E-13
-5.70E-07	5.72E-13
-4.92E-07	3.78E-13
-4.14E-07	1.69E-13
-3.37E-07	-5.13E-14
-2.59E-07	-2.81E-13
-1.81E-07	-5.17E-13
-1.04E-07	-7.55E-13
-2.59E-08	-9.92E-13
5.18E-08	-1.23E-12
1.29E-07	-1.45E-12
2.07E-07	-1.67E-12
2.85E-07	-1.87E-12
3.63E-07	-2.06E-12
4.40E-07	-2.23E-12
5.18E-07	-2.39E-12
5.96E-07	-2.52E-12

a=1.0	e=1.2
z[m]	Fz [N]
-7.99E-07	8.19E-13
-7.03E-07	6.45E-13
-6.07E-07	4.54E-13
-5.11E-07	2.45E-13
-4.16E-07	2.38E-14
-3.20E-07	-2.08E-13
-2.24E-07	-4.48E-13
-1.28E-07	-6.90E-13
-3.20E-08	-9.33E-13
6.39E-08	-1.17E-12
1.60E-07	-1.40E-12
2.56E-07	-1.62E-12
3.52E-07	-1.82E-12
4.48E-07	-2.01E-12
5.43E-07	-2.17E-12
6.39E-07	-2.32E-12
7.35E-07	-2.45E-12

a=1.1	e=1.2
z[m]	Fz [N]
-9.67E-07	9.07E-13
-8.51E-07	7.37E-13
-7.35E-07	5.48E-13
-6.19E-07	3.42E-13
-5.03E-07	1.22E-13
-3.87E-07	-1.11E-13
-2.71E-07	-3.51E-13
-1.55E-07	-5.94E-13
-3.87E-08	-8.37E-13
7.74E-08	-1.08E-12
1.93E-07	-1.30E-12
3.09E-07	-1.52E-12
4.25E-07	-1.72E-12
5.42E-07	-1.90E-12
6.58E-07	-2.07E-12
7.74E-07	-2.21E-12
8.90E-07	-2.33E-12

a=1.2	e=1.2
z[m]	Fz [N]
-1.15E-06	9.91E-13
-1.01E-06	8.26E-13
-8.75E-07	6.42E-13
-7.37E-07	4.41E-13
-5.98E-07	2.24E-13
-4.60E-07	-5.56E-15
-3.22E-07	-2.43E-13
-1.84E-07	-4.84E-13
-4.60E-08	-7.25E-13
9.21E-08	-9.60E-13
2.30E-07	-1.19E-12
3.68E-07	-1.40E-12
5.06E-07	-1.60E-12
6.44E-07	-1.77E-12
7.83E-07	-1.93E-12
9.21E-07	-2.07E-12
1.06E-06	-2.18E-12

a=1.3	e=1.2
z[m]	Fz [N]
-1.35E-06	1.06E-12
-1.19E-06	9.00E-13
-1.03E-06	7.22E-13
-8.64E-07	5.27E-13
-7.02E-07	3.16E-13
-5.40E-07	9.24E-14
-3.78E-07	-1.39E-13
-2.16E-07	-3.75E-13
-5.40E-08	-6.10E-13
1.08E-07	-8.40E-13
2.70E-07	-1.06E-12
4.32E-07	-1.27E-12
5.94E-07	-1.46E-12
7.56E-07	-1.63E-12
9.18E-07	-1.78E-12
1.08E-06	-1.92E-12
1.24E-06	-2.03E-12

a=1.4	e=1.2
z[m]	Fz [N]
-1.57E-06	1.10E-12
-1.38E-06	9.51E-13
-1.19E-06	7.81E-13
-1.00E-06	5.93E-13
-8.15E-07	3.91E-13
-6.27E-07	1.75E-13
-4.39E-07	-4.81E-14
-2.51E-07	-2.76E-13
-6.27E-08	-5.03E-13
1.25E-07	-7.24E-13
3.13E-07	-9.37E-13
5.01E-07	-1.14E-12
6.89E-07	-1.32E-12
8.77E-07	-1.49E-12
1.07E-06	-1.63E-12
1.25E-06	-1.76E-12
1.44E-06	-1.87E-12

a=1.5	e=1.2
z[m]	Fz [N]
-1.80E-06	1.12E-12
-1.58E-06	9.79E-13
-1.37E-06	8.18E-13
-1.15E-06	6.39E-13
-9.35E-07	4.46E-13
-7.19E-07	2.41E-13
-5.03E-07	2.72E-14
-2.88E-07	-1.90E-13
-7.19E-08	-4.07E-13
1.44E-07	-6.19E-13
3.60E-07	-8.21E-13
5.75E-07	-1.01E-12
7.91E-07	-1.19E-12
1.01E-06	-1.35E-12
1.22E-06	-1.49E-12
1.44E-06	-1.61E-12
1.65E-06	-1.72E-12

- e=1.3**

a=0.5	e=1.3
z[m]	Fz [N]
-2.00E-07	-2.53E-14
-1.76E-07	-1.74E-13
-1.52E-07	-3.19E-13
-1.28E-07	-4.59E-13
-1.04E-07	-5.95E-13
-7.99E-08	-7.24E-13
-5.59E-08	-8.47E-13
-3.20E-08	-9.65E-13
-7.99E-09	-1.08E-12
1.60E-08	-1.18E-12
4.00E-08	-1.28E-12
6.39E-08	-1.38E-12
8.79E-08	-1.47E-12
1.12E-07	-1.56E-12
1.36E-07	-1.65E-12
1.60E-07	-1.74E-12
1.84E-07	-1.82E-12

a=0.6	e=1.3
z[m]	Fz [N]
-2.88E-07	4.29E-13
-2.53E-07	2.51E-13
-2.19E-07	7.13E-14
-1.84E-07	-1.08E-13
-1.50E-07	-2.86E-13
-1.15E-07	-4.62E-13
-8.06E-08	-6.35E-13
-4.60E-08	-8.03E-13
-1.15E-08	-9.68E-13
2.30E-08	-1.13E-12
5.75E-08	-1.28E-12
9.21E-08	-1.44E-12
1.27E-07	-1.58E-12
1.61E-07	-1.73E-12
1.96E-07	-1.87E-12
2.30E-07	-2.00E-12
2.65E-07	-2.14E-12

a=0.7	e=1.3
z[m]	Fz [N]
-3.92E-07	5.77E-13
-3.45E-07	3.96E-13
-2.98E-07	2.07E-13
-2.51E-07	1.16E-14
-2.04E-07	-1.88E-13
-1.57E-07	-3.90E-13
-1.10E-07	-5.92E-13
-6.27E-08	-7.94E-13
-1.57E-08	-9.94E-13
3.13E-08	-1.19E-12
7.83E-08	-1.38E-12
1.25E-07	-1.57E-12
1.72E-07	-1.76E-12
2.19E-07	-1.93E-12
2.66E-07	-2.11E-12
3.13E-07	-2.27E-12
3.60E-07	-2.43E-12

a=0.8	e=1.3
z[m]	Fz [N]
-5.11E-07	6.02E-13
-4.50E-07	4.31E-13
-3.89E-07	2.45E-13
-3.27E-07	4.68E-14
-2.66E-07	-1.61E-13
-2.05E-07	-3.75E-13
-1.43E-07	-5.94E-13
-8.18E-08	-8.16E-13
-2.05E-08	-1.04E-12
4.09E-08	-1.26E-12
1.02E-07	-1.47E-12
1.64E-07	-1.68E-12
2.25E-07	-1.89E-12
2.86E-07	-2.08E-12
3.48E-07	-2.27E-12
4.09E-07	-2.44E-12
4.71E-07	-2.60E-12

a=0.9	e=1.3
z[m]	Fz [N]
-6.47E-07	6.28E-13
-5.70E-07	4.65E-13
-4.92E-07	2.84E-13
-4.14E-07	8.76E-14
-3.37E-07	-1.22E-13
-2.59E-07	-3.42E-13
-1.81E-07	-5.70E-13
-1.04E-07	-8.02E-13
-2.59E-08	-1.04E-12
5.18E-08	-1.27E-12
1.29E-07	-1.50E-12
2.07E-07	-1.72E-12
2.85E-07	-1.93E-12
3.63E-07	-2.13E-12
4.40E-07	-2.32E-12
5.18E-07	-2.49E-12
5.96E-07	-2.64E-12

a=1.0	e=1.3
z[m]	Fz [N]
-7.99E-07	6.85E-13
-7.03E-07	5.29E-13
-6.07E-07	3.53E-13
-5.11E-07	1.60E-13
-4.16E-07	-4.91E-14
-3.20E-07	-2.71E-13
-2.24E-07	-5.02E-13
-1.28E-07	-7.40E-13
-3.20E-08	-9.80E-13
6.39E-08	-1.22E-12
1.60E-07	-1.45E-12
2.56E-07	-1.68E-12
3.52E-07	-1.89E-12
4.48E-07	-2.10E-12
5.43E-07	-2.28E-12
6.39E-07	-2.44E-12
7.35E-07	-2.59E-12

a=1.1	e=1.3
z[m]	Fz [N]
-9.67E-07	7.56E-13
-8.51E-07	6.08E-13
-7.35E-07	4.40E-13
-6.19E-07	2.52E-13
-5.03E-07	4.70E-14
-3.87E-07	-1.73E-13
-2.71E-07	-4.03E-13
-1.55E-07	-6.41E-13
-3.87E-08	-8.83E-13
7.74E-08	-1.12E-12
1.93E-07	-1.36E-12
3.09E-07	-1.59E-12
4.25E-07	-1.80E-12
5.42E-07	-2.00E-12
6.58E-07	-2.18E-12
7.74E-07	-2.34E-12
8.90E-07	-2.48E-12

a=1.2	e=1.3
z[m]	Fz [N]
-1.15E-06	8.20E-13
-1.01E-06	6.82E-13
-8.75E-07	5.23E-13
-7.37E-07	3.44E-13
-5.98E-07	1.47E-13
-4.60E-07	-6.63E-14
-3.22E-07	-2.92E-13
-1.84E-07	-5.26E-13
-4.60E-08	-7.65E-13
9.21E-08	-1.00E-12
2.30E-07	-1.24E-12
3.68E-07	-1.46E-12
5.06E-07	-1.67E-12
6.44E-07	-1.87E-12
7.83E-07	-2.05E-12
9.21E-07	-2.21E-12
1.06E-06	-2.35E-12

a=1.3	e=1.3
z[m]	Fz [N]
-1.35E-06	8.62E-13
-1.19E-06	7.36E-13
-1.03E-06	5.90E-13
-8.64E-07	4.22E-13
-7.02E-07	2.36E-13
-5.40E-07	3.25E-14
-3.78E-07	-1.84E-13
-2.16E-07	-4.11E-13
-5.40E-08	-6.42E-13
1.08E-07	-8.75E-13
2.70E-07	-1.10E-12
4.32E-07	-1.32E-12
5.94E-07	-1.53E-12
7.56E-07	-1.73E-12
9.18E-07	-1.91E-12
1.08E-06	-2.07E-12
1.24E-06	-2.21E-12

a=1.4	e=1.3
z[m]	Fz [N]
-1.57E-06	8.76E-13
-1.38E-06	7.64E-13
-1.19E-06	6.32E-13
-1.00E-06	4.78E-13
-8.15E-07	3.05E-13
-6.27E-07	1.15E-13
-4.39E-07	-8.97E-14
-2.51E-07	-3.05E-13
-6.27E-08	-5.27E-13
1.25E-07	-7.51E-13
3.13E-07	-9.73E-13
5.01E-07	-1.19E-12
6.89E-07	-1.39E-12
8.77E-07	-1.59E-12
1.07E-06	-1.77E-12
1.25E-06	-1.93E-12
1.44E-06	-2.08E-12

a=1.5	e=1.3
z[m]	Fz [N]
-1.80E-06	8.61E-13
-1.58E-06	7.65E-13
-1.37E-06	6.48E-13
-1.15E-06	5.10E-13
-9.35E-07	3.53E-13
-7.19E-07	1.78E-13
-5.03E-07	-1.25E-14
-2.88E-07	-2.14E-13
-7.19E-08	-4.24E-13
1.44E-07	-6.38E-13
3.60E-07	-8.51E-13
5.75E-07	-1.06E-12
7.91E-07	-1.26E-12
1.01E-06	-1.45E-12
1.22E-06	-1.63E-12
1.44E-06	-1.80E-12
1.65E-06	-1.96E-12

- e=1.4

a=0.5	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-2.00E-07	-2.15E-14
-1.76E-07	-1.58E-13
-1.52E-07	-2.89E-13
-1.28E-07	-4.15E-13
-1.04E-07	-5.34E-13
-7.99E-08	-6.47E-13
-5.59E-08	-7.54E-13
-3.20E-08	-8.55E-13
-7.99E-09	-9.49E-13
1.60E-08	-1.04E-12
4.00E-08	-1.12E-12
6.39E-08	-1.21E-12
8.79E-08	-1.29E-12
1.12E-07	-1.37E-12
1.36E-07	-1.45E-12
1.60E-07	-1.52E-12
1.84E-07	-1.61E-12

a=0.6	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-2.88E-07	4.28E-13
-2.53E-07	2.65E-13
-2.19E-07	1.00E-13
-1.84E-07	-6.33E-14
-1.50E-07	-2.26E-13
-1.15E-07	-3.86E-13
-8.06E-08	-5.44E-13
-4.60E-08	-6.98E-13
-1.15E-08	-8.49E-13
2.30E-08	-9.97E-13
5.75E-08	-1.14E-12
9.21E-08	-1.29E-12
1.27E-07	-1.43E-12
1.61E-07	-1.57E-12
1.96E-07	-1.71E-12
2.30E-07	-1.85E-12
2.65E-07	-1.98E-12

a=0.7	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-3.92E-07	5.50E-13
-3.45E-07	3.84E-13
-2.98E-07	2.10E-13
-2.51E-07	2.99E-14
-2.04E-07	-1.55E-13
-1.57E-07	-3.43E-13
-1.10E-07	-5.33E-13
-6.27E-08	-7.24E-13
-1.57E-08	-9.14E-13
3.13E-08	-1.10E-12
7.83E-08	-1.29E-12
1.25E-07	-1.48E-12
1.72E-07	-1.66E-12
2.19E-07	-1.85E-12
2.66E-07	-2.03E-12
3.13E-07	-2.20E-12
3.60E-07	-2.37E-12

a=0.8	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-5.11E-07	5.58E-13
-4.50E-07	3.99E-13
-3.89E-07	2.26E-13
-3.27E-07	4.01E-14
-2.66E-07	-1.56E-13
-2.05E-07	-3.59E-13
-1.43E-07	-5.70E-13
-8.18E-08	-7.84E-13
-2.05E-08	-1.00E-12
4.09E-08	-1.22E-12
1.02E-07	-1.44E-12
1.64E-07	-1.65E-12
2.25E-07	-1.87E-12
2.86E-07	-2.07E-12
3.48E-07	-2.27E-12
4.09E-07	-2.46E-12
4.71E-07	-2.64E-12

a=0.9	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-6.47E-07	5.80E-13
-5.70E-07	4.26E-13
-4.92E-07	2.54E-13
-4.14E-07	6.70E-14
-3.37E-07	-1.34E-13
-2.59E-07	-3.48E-13
-1.81E-07	-5.71E-13
-1.04E-07	-8.00E-13
-2.59E-08	-1.03E-12
5.18E-08	-1.27E-12
1.29E-07	-1.51E-12
2.07E-07	-1.74E-12
2.85E-07	-1.96E-12
3.63E-07	-2.18E-12
4.40E-07	-2.38E-12
5.18E-07	-2.57E-12
5.96E-07	-2.75E-12

a=1.0	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-7.99E-07	6.39E-13
-7.03E-07	4.90E-13
-6.07E-07	3.22E-13
-5.11E-07	1.35E-13
-4.16E-07	-6.85E-14
-3.20E-07	-2.86E-13
-2.24E-07	-5.16E-13
-1.28E-07	-7.55E-13
-3.20E-08	-9.99E-13
6.39E-08	-1.24E-12
1.60E-07	-1.49E-12
2.56E-07	-1.73E-12
3.52E-07	-1.96E-12
4.48E-07	-2.18E-12
5.43E-07	-2.38E-12
6.39E-07	-2.56E-12
7.35E-07	-2.73E-12

a=1.1	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-9.67E-07	7.15E-13
-8.51E-07	5.73E-13
-7.35E-07	4.11E-13
-6.19E-07	2.28E-13
-5.03E-07	2.72E-14
-3.87E-07	-1.90E-13
-2.71E-07	-4.21E-13
-1.55E-07	-6.62E-13
-3.87E-08	-9.10E-13
7.74E-08	-1.16E-12
1.93E-07	-1.41E-12
3.09E-07	-1.65E-12
4.25E-07	-1.88E-12
5.42E-07	-2.10E-12
6.58E-07	-2.30E-12
7.74E-07	-2.48E-12
8.90E-07	-2.64E-12

a=1.2	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-1.15E-06	7.81E-13
-1.01E-06	6.50E-13
-8.75E-07	4.98E-13
-7.37E-07	3.24E-13
-5.98E-07	1.30E-13
-4.60E-07	-8.19E-14
-3.22E-07	-3.09E-13
-1.84E-07	-5.47E-13
-4.60E-08	-7.92E-13
9.21E-08	-1.04E-12
2.30E-07	-1.29E-12
3.68E-07	-1.53E-12
5.06E-07	-1.76E-12
6.44E-07	-1.97E-12
7.83E-07	-2.17E-12
9.21E-07	-2.35E-12
1.06E-06	-2.51E-12

a=1.3	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-1.35E-06	8.22E-13
-1.19E-06	7.05E-13
-1.03E-06	5.66E-13
-8.64E-07	4.04E-13
-7.02E-07	2.22E-13
-5.40E-07	2.06E-14
-3.78E-07	-1.97E-13
-2.16E-07	-4.28E-13
-5.40E-08	-6.67E-13
1.08E-07	-9.10E-13
2.70E-07	-1.15E-12
4.32E-07	-1.39E-12
5.94E-07	-1.62E-12
7.56E-07	-1.83E-12
9.18E-07	-2.03E-12
1.08E-06	-2.21E-12
1.24E-06	-2.38E-12

a=1.4	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-1.57E-06	8.30E-13
-1.38E-06	7.29E-13
-1.19E-06	6.06E-13
-1.00E-06	4.61E-13
-8.15E-07	2.94E-13
-6.27E-07	1.06E-13
-4.39E-07	-9.82E-14
-2.51E-07	-3.17E-13
-6.27E-08	-5.46E-13
1.25E-07	-7.81E-13
3.13E-07	-1.02E-12
5.01E-07	-1.25E-12
6.89E-07	-1.47E-12
8.77E-07	-1.69E-12
1.07E-06	-1.89E-12
1.25E-06	-2.08E-12
1.44E-06	-2.25E-12

a=1.5	e=1.4
z[m]	Fz [N]
-1.80E-06	8.06E-13
-1.58E-06	7.23E-13
-1.37E-06	6.18E-13
-1.15E-06	4.91E-13
-9.35E-07	3.42E-13
-7.19E-07	1.72E-13
-5.03E-07	-1.71E-14
-2.88E-07	-2.21E-13
-7.19E-08	-4.38E-13
1.44E-07	-6.62E-13
3.60E-07	-8.89E-13
5.75E-07	-1.12E-12
7.91E-07	-1.34E-12
1.01E-06	-1.55E-12
1.22E-06	-1.76E-12
1.44E-06	-1.95E-12
1.65E-06	-2.14E-12

- e=1.5

a=0.5	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-2.00E-07	-1.48E-14
-1.76E-07	-1.28E-13
-1.52E-07	-2.36E-13
-1.28E-07	-3.38E-13
-1.04E-07	-4.33E-13
-7.99E-08	-5.23E-13
-5.59E-08	-6.06E-13
-3.20E-08	-6.85E-13
-7.99E-09	-7.59E-13
1.60E-08	-8.29E-13
4.00E-08	-8.97E-13
6.39E-08	-9.63E-13
8.79E-08	-1.03E-12
1.12E-07	-1.10E-12
1.36E-07	-1.17E-12
1.60E-07	-1.24E-12
1.84E-07	-1.31E-12

a=0.6	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-2.88E-07	4.02E-13
-2.53E-07	2.58E-13
-2.19E-07	1.15E-13
-1.84E-07	-2.75E-14
-1.50E-07	-1.68E-13
-1.15E-07	-3.07E-13
-8.06E-08	-4.43E-13
-4.60E-08	-5.77E-13
-1.15E-08	-7.09E-13
2.30E-08	-8.40E-13
5.75E-08	-9.70E-13
9.21E-08	-1.10E-12
1.27E-07	-1.23E-12
1.61E-07	-1.36E-12
1.96E-07	-1.50E-12
2.30E-07	-1.63E-12
2.65E-07	-1.77E-12

a=0.7	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-3.92E-07	5.13E-13
-3.45E-07	3.61E-13
-2.98E-07	2.02E-13
-2.51E-07	3.72E-14
-2.04E-07	-1.32E-13
-1.57E-07	-3.03E-13
-1.10E-07	-4.78E-13
-6.27E-08	-6.53E-13
-1.57E-08	-8.31E-13
3.13E-08	-1.01E-12
7.83E-08	-1.19E-12
1.25E-07	-1.37E-12
1.72E-07	-1.55E-12
2.19E-07	-1.73E-12
2.66E-07	-1.91E-12
3.13E-07	-2.10E-12
3.60E-07	-2.28E-12

a=0.8	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-5.11E-07	5.28E-13
-4.50E-07	3.75E-13
-3.89E-07	2.09E-13
-3.27E-07	3.25E-14
-2.66E-07	-1.54E-13
-2.05E-07	-3.49E-13
-1.43E-07	-5.50E-13
-8.18E-08	-7.57E-13
-2.05E-08	-9.67E-13
4.09E-08	-1.18E-12
1.02E-07	-1.40E-12
1.64E-07	-1.61E-12
2.25E-07	-1.83E-12
2.86E-07	-2.04E-12
3.48E-07	-2.25E-12
4.09E-07	-2.45E-12
4.71E-07	-2.65E-12

a=0.9	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-6.47E-07	5.64E-13
-5.70E-07	4.11E-13
-4.92E-07	2.41E-13
-4.14E-07	5.57E-14
-3.37E-07	-1.43E-13
-2.59E-07	-3.53E-13
-1.81E-07	-5.74E-13
-1.04E-07	-8.02E-13
-2.59E-08	-1.04E-12
5.18E-08	-1.27E-12
1.29E-07	-1.51E-12
2.07E-07	-1.75E-12
2.85E-07	-1.98E-12
3.63E-07	-2.21E-12
4.40E-07	-2.43E-12
5.18E-07	-2.63E-12
5.96E-07	-2.82E-12

a=1.0	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-7.99E-07	6.42E-13
-7.03E-07	4.89E-13
-6.07E-07	3.17E-13
-5.11E-07	1.28E-13
-4.16E-07	-7.83E-14
-3.20E-07	-2.99E-13
-2.24E-07	-5.31E-13
-1.28E-07	-7.73E-13
-3.20E-08	-1.02E-12
6.39E-08	-1.27E-12
1.60E-07	-1.53E-12
2.56E-07	-1.77E-12
3.52E-07	-2.01E-12
4.48E-07	-2.24E-12
5.43E-07	-2.46E-12
6.39E-07	-2.66E-12
7.35E-07	-2.83E-12

a=1.1	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-9.67E-07	7.37E-13
-8.51E-07	5.88E-13
-7.35E-07	4.19E-13
-6.19E-07	2.30E-13
-5.03E-07	2.18E-14
-3.87E-07	-2.02E-13
-2.71E-07	-4.40E-13
-1.55E-07	-6.88E-13
-3.87E-08	-9.43E-13
7.74E-08	-1.20E-12
1.93E-07	-1.46E-12
3.09E-07	-1.71E-12
4.25E-07	-1.95E-12
5.42E-07	-2.18E-12
6.58E-07	-2.39E-12
7.74E-07	-2.58E-12
8.90E-07	-2.74E-12

a=1.2	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-1.15E-06	8.21E-13
-1.01E-06	6.81E-13
-8.75E-07	5.18E-13
-7.37E-07	3.35E-13
-5.98E-07	1.32E-13
-4.60E-07	-8.97E-14
-3.22E-07	-3.26E-13
-1.84E-07	-5.74E-13
-4.60E-08	-8.29E-13
9.21E-08	-1.09E-12
2.30E-07	-1.34E-12
3.68E-07	-1.59E-12
5.06E-07	-1.83E-12
6.44E-07	-2.06E-12
7.83E-07	-2.26E-12
9.21E-07	-2.45E-12
1.06E-06	-2.61E-12

a=1.3	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-1.03E-06	5.98E-13
-8.64E-07	4.25E-13
-7.02E-07	2.31E-13
-5.40E-07	1.84E-14
-3.78E-07	-2.10E-13
-2.16E-07	-4.52E-13
-5.40E-08	-7.01E-13
1.08E-07	-9.54E-13
2.70E-07	-1.21E-12

a=1.4	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-1.00E-06	4.89E-13
-8.15E-07	3.10E-13
-6.27E-07	1.10E-13
-4.39E-07	-1.07E-13
-2.51E-07	-3.37E-13
-6.27E-08	-5.76E-13
1.25E-07	-8.21E-13
3.13E-07	-1.07E-12
5.01E-07	-1.31E-12
6.89E-07	-1.54E-12

a=1.5	e=1.5
z[m]	Fz [N]
-1.15E-06	5.25E-13
-9.35E-07	3.63E-13
-7.19E-07	1.80E-13
-5.03E-07	-2.07E-14
-2.88E-07	-2.36E-13
-7.19E-08	-4.63E-13
1.44E-07	-6.97E-13
3.60E-07	-9.33E-13
5.75E-07	-1.17E-12
7.91E-07	-1.39E-12

Μετρήσεις από υποκεφάλαιο με την ακτινική μετατόπιση για $\lambda=656\text{nm}$ & $e=0.7$.

$X=0.25\mu\text{m}$ & $y=0.25\mu\text{m}$

e=0.7	a=0.5
z	Fz
-2.00E-07	4.33E-13
-1.76E-07	3.56E-13
-1.52E-07	2.71E-13
-1.28E-07	1.80E-13
-1.04E-07	8.23E-14
-7.99E-08	-1.89E-14
-5.59E-08	-1.22E-13
-3.20E-08	-2.26E-13
-7.99E-09	-3.30E-13
1.60E-08	-4.31E-13
4.00E-08	-5.29E-13
6.39E-08	-6.22E-13
8.79E-08	-7.10E-13
1.12E-07	-7.90E-13
1.36E-07	-8.61E-13
1.60E-07	-9.23E-13
1.84E-07	-9.75E-13

e=0.7	a=0.6
z	Fz
-2.88E-07	3.98E-13
-2.53E-07	3.39E-13
-2.19E-07	2.72E-13
-1.84E-07	1.97E-13
-1.50E-07	1.15E-13
-1.15E-07	2.73E-14
-8.06E-08	-6.41E-14
-4.60E-08	-1.57E-13
-1.15E-08	-2.51E-13
2.30E-08	-3.42E-13
5.75E-08	-4.29E-13
9.21E-08	-5.10E-13
1.27E-07	-5.82E-13
1.61E-07	-6.46E-13
1.96E-07	-6.99E-13
2.30E-07	-7.40E-13
2.65E-07	-7.71E-13

e=0.7	a=0.7
z	Fz
-3.92E-07	3.26E-13
-3.45E-07	2.76E-13
-2.98E-07	2.19E-13
-2.51E-07	1.55E-13
-2.04E-07	8.55E-14
-1.57E-07	1.06E-14
-1.10E-07	-6.79E-14
-6.27E-08	-1.48E-13
-1.57E-08	-2.28E-13
3.13E-08	-3.06E-13
7.83E-08	-3.79E-13
1.25E-07	-4.45E-13
1.72E-07	-5.03E-13
2.19E-07	-5.52E-13
2.66E-07	-5.90E-13
3.13E-07	-6.18E-13
3.60E-07	-6.34E-13

e=0.7	a=0.8
z	Fz
-5.11E-07	2.79E-13
-4.50E-07	2.28E-13
-3.89E-07	1.72E-13
-3.27E-07	1.12E-13
-2.66E-07	4.75E-14
-2.05E-07	-2.05E-14
-1.43E-07	-9.08E-14
-8.18E-08	-1.62E-13
-2.05E-08	-2.31E-13
4.09E-08	-2.98E-13
1.02E-07	-3.59E-13
1.64E-07	-4.13E-13
2.25E-07	-4.58E-13
2.86E-07	-4.94E-13
3.48E-07	-5.19E-13
4.09E-07	-5.33E-13
4.71E-07	-5.36E-13

e=0.7	a=0.9
z	Fz
-6.47E-07	2.94E-13
-5.70E-07	2.30E-13
-4.92E-07	1.64E-13
-4.14E-07	9.77E-14
-3.37E-07	2.96E-14
-2.59E-07	-3.91E-14
-1.81E-07	-1.08E-13
-1.04E-07	-1.74E-13
-2.59E-08	-2.38E-13
5.18E-08	-2.96E-13
1.29E-07	-3.48E-13
2.07E-07	-3.91E-13
2.85E-07	-4.24E-13
3.63E-07	-4.47E-13
4.40E-07	-4.57E-13
5.18E-07	-4.57E-13
5.96E-07	-4.44E-13

e=0.7	a=1.0
z	Fz
-7.99E-07	3.77E-13
-7.03E-07	2.90E-13
-6.07E-07	2.05E-13
-5.11E-07	1.22E-13
-4.16E-07	4.23E-14
-3.20E-07	-3.46E-14
-2.24E-07	-1.08E-13
-1.28E-07	-1.75E-13
-3.20E-08	-2.37E-13
6.39E-08	-2.90E-13
1.60E-07	-3.34E-13
2.56E-07	-3.68E-13
3.52E-07	-3.89E-13
4.48E-07	-3.97E-13
5.43E-07	-3.92E-13
6.39E-07	-3.74E-13
7.35E-07	-3.44E-13

e=0.7	a=1.1
z	Fz
-9.67E-07	5.14E-13
-8.51E-07	3.97E-13
-7.35E-07	2.86E-13
-6.19E-07	1.81E-13
-5.03E-07	8.34E-14
-3.87E-07	-7.36E-15
-2.71E-07	-8.99E-14
-1.55E-07	-1.63E-13
-3.87E-08	-2.26E-13
7.74E-08	-2.77E-13
1.93E-07	-3.14E-13
3.09E-07	-3.38E-13
4.25E-07	-3.46E-13
5.42E-07	-3.40E-13
6.58E-07	-3.17E-13
7.74E-07	-2.80E-13
8.90E-07	-2.30E-13

e=0.7	a=1.2
z	Fz
-1.15E-06	6.88E-13
-1.01E-06	5.39E-13
-8.75E-07	3.98E-13
-7.37E-07	2.67E-13
-5.98E-07	1.46E-13
-4.60E-07	3.72E-14
-3.22E-07	-5.87E-14
-1.84E-07	-1.40E-13
-4.60E-08	-2.07E-13
9.21E-08	-2.56E-13
2.30E-07	-2.88E-13
3.68E-07	-3.02E-13
5.06E-07	-2.97E-13
6.44E-07	-2.74E-13
7.83E-07	-2.32E-13
9.21E-07	-1.74E-13
1.06E-06	-9.99E-14

e=0.7	a=1.3
z	Fz
-1.35E-06	8.86E-13
-1.19E-06	7.02E-13
-1.03E-06	5.29E-13
-8.64E-07	3.69E-13
-7.02E-07	2.23E-13
-5.40E-07	9.30E-14
-3.78E-07	-1.88E-14
-2.16E-07	-1.11E-13
-5.40E-08	-1.82E-13
1.08E-07	-2.32E-13
2.70E-07	-2.58E-13
4.32E-07	-2.62E-13
5.94E-07	-2.42E-13
7.56E-07	-2.00E-13
9.18E-07	-1.37E-13
1.08E-06	-5.53E-14
1.24E-06	4.36E-14

e=0.7	a=1.4
z	Fz
-1.57E-06	1.10E-12
-1.38E-06	8.80E-13
-1.19E-06	6.73E-13
-1.00E-06	4.82E-13
-8.15E-07	3.08E-13
-6.27E-07	1.55E-13
-4.39E-07	2.58E-14
-2.51E-07	-7.85E-14
-6.27E-08	-1.56E-13
1.25E-07	-2.05E-13
3.13E-07	-2.26E-13
5.01E-07	-2.18E-13
6.89E-07	-1.83E-13
8.77E-07	-1.21E-13
1.07E-06	-3.45E-14
1.25E-06	7.30E-14
1.44E-06	1.99E-13

e=0.7	a=1.5
z	Fz
-1.80E-06	1.32E-12
-1.58E-06	1.07E-12
-1.37E-06	8.25E-13
-1.15E-06	6.01E-13
-9.35E-07	3.99E-13
-7.19E-07	2.21E-13
-5.03E-07	7.21E-14
-2.88E-07	-4.55E-14
-7.19E-08	-1.30E-13
1.44E-07	-1.79E-13
3.60E-07	-1.93E-13
5.75E-07	-1.73E-13
7.91E-07	-1.20E-13
1.01E-06	-3.64E-14
1.22E-06	7.48E-14
1.44E-06	2.09E-13
1.65E-06	3.63E-13

$X=0\mu\text{m}$ & $y=0.25\mu\text{m}$

e=0.7	a=0.5
z	Fz
-2.00E-07	5.03E-13
-1.76E-07	3.68E-13
-1.52E-07	2.30E-13
-1.28E-07	8.92E-14
-1.04E-07	-5.18E-14
-7.99E-08	-1.92E-13
-5.59E-08	-3.29E-13
-3.20E-08	-4.64E-13
-7.99E-09	-5.94E-13
1.60E-08	-7.20E-13
4.00E-08	-8.41E-13
6.39E-08	-9.56E-13
8.79E-08	-1.07E-12
1.12E-07	-1.17E-12
1.36E-07	-1.26E-12
1.60E-07	-1.35E-12
1.84E-07	-1.43E-12

e=0.7	a=0.6
z	Fz
-2.88E-07	5.69E-13
-2.53E-07	4.60E-13
-2.19E-07	3.43E-13
-1.84E-07	2.18E-13
-1.50E-07	8.80E-14
-1.15E-07	-4.50E-14
-8.06E-08	-1.79E-13
-4.60E-08	-3.11E-13
-1.15E-08	-4.40E-13
2.30E-08	-5.63E-13
5.75E-08	-6.79E-13
9.21E-08	-7.85E-13
1.27E-07	-8.81E-13
1.61E-07	-9.64E-13
1.96E-07	-1.03E-12
2.30E-07	-1.09E-12
2.65E-07	-1.13E-12

e=0.7	a=0.7
z	Fz
-3.92E-07	4.99E-13
-3.45E-07	4.07E-13
-2.98E-07	3.07E-13
-2.51E-07	2.01E-13
-2.04E-07	8.80E-14
-1.57E-07	-2.81E-14
-1.10E-07	-1.46E-13
-6.27E-08	-2.62E-13
-1.57E-08	-3.75E-13
3.13E-08	-4.81E-13
7.83E-08	-5.79E-13
1.25E-07	-6.65E-13
1.72E-07	-7.39E-13
2.19E-07	-7.99E-13
2.66E-07	-8.44E-13
3.13E-07	-8.73E-13
3.60E-07	-8.87E-13

e=0.7	a=0.8
z	Fz
-5.11E-07	4.33E-13
-4.50E-07	3.44E-13
-3.89E-07	2.50E-13
-3.27E-07	1.51E-13
-2.66E-07	4.82E-14
-2.05E-07	-5.65E-14
-1.43E-07	-1.61E-13
-8.18E-08	-2.63E-13
-2.05E-08	-3.60E-13
4.09E-08	-4.50E-13
1.02E-07	-5.30E-13
1.64E-07	-5.98E-13
2.25E-07	-6.52E-13
2.86E-07	-6.92E-13
3.48E-07	-7.16E-13
4.09E-07	-7.26E-13
4.71E-07	-7.21E-13

e=0.7	a=0.9
z	Fz
-6.47E-07	4.29E-13
-5.70E-07	3.29E-13
-4.92E-07	2.27E-13
-4.14E-07	1.24E-13
-3.37E-07	2.02E-14
-2.59E-07	-8.19E-14
-1.81E-07	-1.81E-13
-1.04E-07	-2.75E-13
-2.59E-08	-3.61E-13
5.18E-08	-4.37E-13
1.29E-07	-5.01E-13
2.07E-07	-5.52E-13
2.85E-07	-5.88E-13
3.63E-07	-6.08E-13
4.40E-07	-6.12E-13
5.18E-07	-6.01E-13
5.96E-07	-5.75E-13

e=0.7	a=1.0
z	Fz
-7.99E-07	4.98E-13
-7.03E-07	3.76E-13
-6.07E-07	2.56E-13
-5.11E-07	1.38E-13
-4.16E-07	2.50E-14
-3.20E-07	-8.29E-14
-2.24E-07	-1.83E-13
-1.28E-07	-2.75E-13
-3.20E-08	-3.55E-13
6.39E-08	-4.21E-13
1.60E-07	-4.72E-13
2.56E-07	-5.07E-13
3.52E-07	-5.24E-13
4.48E-07	-5.23E-13
5.43E-07	-5.04E-13
6.39E-07	-4.68E-13
7.35E-07	-4.16E-13

e=0.7	a=1.1
z	Fz
-9.67E-07	6.31E-13
-8.51E-07	4.80E-13
-7.35E-07	3.34E-13
-6.19E-07	1.95E-13
-5.03E-07	6.42E-14
-3.87E-07	-5.61E-14
-2.71E-07	-1.64E-13
-1.55E-07	-2.58E-13
-3.87E-08	-3.35E-13
7.74E-08	-3.94E-13
1.93E-07	-4.34E-13
3.09E-07	-4.53E-13
4.25E-07	-4.50E-13
5.42E-07	-4.27E-13
6.58E-07	-3.83E-13
7.74E-07	-3.20E-13
8.90E-07	-2.39E-13

e=0.7	a=1.2
z	Fz
-1.15E-06	8.09E-13
-1.01E-06	6.26E-13
-8.75E-07	4.50E-13
-7.37E-07	2.84E-13
-5.98E-07	1.31E-13
-4.60E-07	-6.65E-15
-3.22E-07	-1.27E-13
-1.84E-07	-2.27E-13
-4.60E-08	-3.04E-13
9.21E-08	-3.58E-13
2.30E-07	-3.87E-13
3.68E-07	-3.91E-13
5.06E-07	-3.69E-13
6.44E-07	-3.22E-13
7.83E-07	-2.52E-13
9.21E-07	-1.62E-13
1.06E-06	-5.27E-14

e=0.7	a=1.3
z	Fz
-1.35E-06	1.02E-12
-1.19E-06	8.00E-13
-1.03E-06	5.91E-13
-8.64E-07	3.95E-13
-7.02E-07	2.17E-13
-5.40E-07	5.81E-14
-3.78E-07	-7.71E-14
-2.16E-07	-1.86E-13
-5.40E-08	-2.67E-13
1.08E-07	-3.17E-13
2.70E-07	-3.37E-13
4.32E-07	-3.25E-13
5.94E-07	-2.84E-13
7.56E-07	-2.14E-13
9.18E-07	-1.18E-13
1.08E-06	-1.80E-16
1.24E-06	1.37E-13

e=0.7	a=1.4
z	Fz
-1.57E-06	1.25E-12
-1.38E-06	9.92E-13
-1.19E-06	7.48E-13
-1.00E-06	5.20E-13
-8.15E-07	3.13E-13
-6.27E-07	1.32E-13
-4.39E-07	-2.13E-14
-2.51E-07	-1.42E-13
-6.27E-08	-2.27E-13
1.25E-07	-2.75E-13
3.13E-07	-2.86E-13
5.01E-07	-2.60E-13
6.89E-07	-1.99E-13
8.77E-07	-1.06E-13
1.07E-06	1.57E-14
1.25E-06	1.61E-13
1.44E-06	3.26E-13

e=0.7	a=1.5
z	Fz
-1.80E-06	1.49E-12
-1.58E-06	1.20E-12
-1.37E-06	9.15E-13
-1.15E-06	6.54E-13
-9.35E-07	4.16E-13
-7.19E-07	2.09E-13
-5.03E-07	3.65E-14
-2.88E-07	-9.66E-14
-7.19E-08	-1.88E-13
1.44E-07	-2.34E-13
3.60E-07	-2.37E-13
5.75E-07	-1.97E-13
7.91E-07	-1.16E-13
1.01E-06	7.70E-16
1.22E-06	1.49E-13
1.44E-06	3.22E-13
1.65E-06	5.14E-13

X=0.25 μ m & y=0 μ m

e=0.7	a=0.5
z	Fz
-2.00E-07	3.90E-13
-1.76E-07	2.56E-13
-1.52E-07	1.17E-13
-1.28E-07	-2.51E-14
-1.04E-07	-1.70E-13
-7.99E-08	-3.16E-13
-5.59E-08	-4.61E-13
-3.20E-08	-6.06E-13
-7.99E-09	-7.49E-13
1.60E-08	-8.88E-13
4.00E-08	-1.02E-12
6.39E-08	-1.15E-12
8.79E-08	-1.28E-12
1.12E-07	-1.39E-12
1.36E-07	-1.50E-12
1.60E-07	-1.60E-12
1.84E-07	-1.69E-12

e=0.7	a=0.6
z	Fz
-2.88E-07	4.96E-13
-2.53E-07	3.73E-13
-2.19E-07	2.41E-13
-1.84E-07	1.02E-13
-1.50E-07	-4.39E-14
-1.15E-07	-1.94E-13
-8.06E-08	-3.45E-13
-4.60E-08	-4.97E-13
-1.15E-08	-6.47E-13
2.30E-08	-7.92E-13
5.75E-08	-9.31E-13
9.21E-08	-1.06E-12
1.27E-07	-1.18E-12
1.61E-07	-1.29E-12
1.96E-07	-1.39E-12
2.30E-07	-1.47E-12
2.65E-07	-1.53E-12

e=0.7	a=0.7
z	Fz
-3.92E-07	4.81E-13
-3.45E-07	3.66E-13
-2.98E-07	2.42E-13
-2.51E-07	1.10E-13
-2.04E-07	-2.88E-14
-1.57E-07	-1.73E-13
-1.10E-07	-3.19E-13
-6.27E-08	-4.66E-13
-1.57E-08	-6.11E-13
3.13E-08	-7.50E-13
7.83E-08	-8.81E-13
1.25E-07	-1.00E-12
1.72E-07	-1.11E-12
2.19E-07	-1.20E-12
2.66E-07	-1.28E-12
3.13E-07	-1.34E-12
3.60E-07	-1.39E-12

e=0.7	a=0.8
z	Fz
-5.11E-07	4.81E-13
-4.50E-07	3.65E-13
-3.89E-07	2.41E-13
-3.27E-07	1.10E-13
-2.66E-07	-2.68E-14
-2.05E-07	-1.68E-13
-1.43E-07	-3.10E-13
-8.18E-08	-4.52E-13
-2.05E-08	-5.90E-13
4.09E-08	-7.21E-13
1.02E-07	-8.43E-13
1.64E-07	-9.52E-13
2.25E-07	-1.05E-12
2.86E-07	-1.13E-12
3.48E-07	-1.19E-12
4.09E-07	-1.23E-12
4.71E-07	-1.26E-12

e=0.7	a=0.9
z	Fz
-6.47E-07	5.55E-13
-5.70E-07	4.24E-13
-4.92E-07	2.89E-13
-4.14E-07	1.49E-13
-3.37E-07	5.67E-15
-2.59E-07	-1.39E-13
-1.81E-07	-2.83E-13
-1.04E-07	-4.23E-13
-2.59E-08	-5.58E-13
5.18E-08	-6.82E-13
1.29E-07	-7.95E-13
2.07E-07	-8.93E-13
2.85E-07	-9.74E-13
3.63E-07	-1.04E-12
4.40E-07	-1.08E-12
5.18E-07	-1.10E-12
5.96E-07	-1.11E-12

e=0.7	a=1.0
z	Fz
-7.99E-07	7.00E-13
-7.03E-07	5.46E-13
-6.07E-07	3.90E-13
-5.11E-07	2.32E-13
-4.16E-07	7.51E-14
-3.20E-07	-8.01E-14
-2.24E-07	-2.31E-13
-1.28E-07	-3.74E-13
-3.20E-08	-5.08E-13
6.39E-08	-6.29E-13
1.60E-07	-7.33E-13
2.56E-07	-8.20E-13
3.52E-07	-8.87E-13
4.48E-07	-9.32E-13
5.43E-07	-9.55E-13
6.39E-07	-9.56E-13
7.35E-07	-9.35E-13

e=0.7	a=1.1
z	Fz
-9.67E-07	8.91E-13
-8.51E-07	7.09E-13
-7.35E-07	5.27E-13
-6.19E-07	3.47E-13
-5.03E-07	1.70E-13
-3.87E-07	6.52E-17
-2.71E-07	-1.61E-13
-1.55E-07	-3.11E-13
-3.87E-08	-4.46E-13
7.74E-08	-5.64E-13
1.93E-07	-6.61E-13
3.09E-07	-7.36E-13
4.25E-07	-7.87E-13
5.42E-07	-8.12E-13
6.58E-07	-8.13E-13
7.74E-07	-7.89E-13
8.90E-07	-7.43E-13

e=0.7	a=1.2
z	Fz
-1.15E-06	1.10E-12
-1.01E-06	8.91E-13
-8.75E-07	6.81E-13
-7.37E-07	4.76E-13
-5.98E-07	2.78E-13
-4.60E-07	8.97E-14
-3.22E-07	-8.47E-14
-1.84E-07	-2.42E-13
-4.60E-08	-3.80E-13
9.21E-08	-4.95E-13
2.30E-07	-5.84E-13
3.68E-07	-6.46E-13
5.06E-07	-6.79E-13
6.44E-07	-6.83E-13
7.83E-07	-6.60E-13
9.21E-07	-6.09E-13
1.06E-06	-5.34E-13

e=0.7	a=1.3
z	Fz
-1.35E-06	1.32E-12
-1.19E-06	1.08E-12
-1.03E-06	8.41E-13
-8.64E-07	6.09E-13
-7.02E-07	3.87E-13
-5.40E-07	1.80E-13
-3.78E-07	-8.42E-15
-2.16E-07	-1.75E-13
-5.40E-08	-3.15E-13
1.08E-07	-4.27E-13
2.70E-07	-5.07E-13
4.32E-07	-5.54E-13
5.94E-07	-5.68E-13
7.56E-07	-5.49E-13
9.18E-07	-4.99E-13
1.08E-06	-4.19E-13
1.24E-06	-3.14E-13

e=0.7	a=1.4
z	Fz
-1.57E-06	1.54E-12
-1.38E-06	1.27E-12
-1.19E-06	1.00E-12
-1.00E-06	7.40E-13
-8.15E-07	4.94E-13
-6.27E-07	2.67E-13
-4.39E-07	6.30E-14
-2.51E-07	-1.12E-13
-6.27E-08	-2.56E-13
1.25E-07	-3.64E-13
3.13E-07	-4.34E-13
5.01E-07	-4.65E-13
6.89E-07	-4.58E-13
8.77E-07	-4.13E-13
1.07E-06	-3.34E-13
1.25E-06	-2.24E-13
1.44E-06	-8.74E-14

e=0.7	a=1.5
z	Fz
-1.80E-06	1.76E-12
-1.58E-06	1.46E-12
-1.37E-06	1.16E-12
-1.15E-06	8.68E-13
-9.35E-07	5.96E-13
-7.19E-07	3.47E-13
-5.03E-07	1.28E-13
-2.88E-07	-5.72E-14
-7.19E-08	-2.03E-13
1.44E-07	-3.07E-13
3.60E-07	-3.66E-13
5.75E-07	-3.80E-13
7.91E-07	-3.49E-13
1.01E-06	-2.78E-13
1.22E-06	-1.69E-13
1.44E-06	-2.68E-14
1.65E-06	1.42E-13